



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÁVRH TROJITÉHO LABORATORNÍHO NAPÁJECÍHO ZDROJE

DESIGN OF TRIPLE LABORATORY POWER SUPPLY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Patrik Gerbel

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Patrik Gerbel

ID: 164270

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Návrh trojitého laboratorního napájecího zdroje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte zapojení trojitého laboratorního napájecího zdroje s regulovatelnými výstupy 2 x 0-30V / 3A a 1 x 0-6V / 5A. Napájecí zdroj opatřete u všech kanálů digitálními indikátory výstupního napětí a proudu, jejich řízení založte na aplikaci vhodného mikrokontroléru. Zdroj opatřete elektronickými ochranami přetížení (proudové, tepelné). Části navržených zapojení simulujte v programu PSpice.

Na základě předchozích teoretických prací proveďte konstrukci napájecího zdroje předepsaných parametrů, včetně návrhu desek plošných spojů v Eagle a vhodného transformátoru. Zdroj oživte a proveďte laboratorní měření jeho parametrů, výsledky porovnejte s počítačovými simulacemi.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KREJČÍŘÍK, A. Lineární napájecí zdroje. Praha: BEN - technická literatura, 2002.

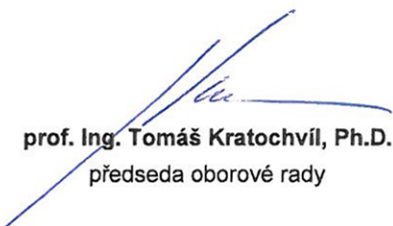
[2] BASSO, Ch.P. Switch-Mode Power Supplies - Spice Simulations and Practical Designs. New York: McGraw-Hill Professional, 2008.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 30.5.2017

Vedoucí práce: prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

Konzultant:


prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom a konštrukciou trojitého laboratórneho napájacieho zdroja. Zariadenie obsahuje tri výstupy, z ktorých jeden je realizovaný spínaným regulátorom LTM4605, jeho výstupné napätie je možné regulovať v rozsahu 0-6V a maximálny výstupný prúd je 5A. Ďalšie dva výstupy sú realizované ako lineárne s regulovateľnými napäťovými výstupmi 0-30V a nastaviteľnými prúdovými obmedzeniami v rozsahu 0-3A. Výstupné parametre sú zaznamenávané dvojicou mikrokontrolérov a zobrazované na dvoch LCD displejoch. V práci sú taktiež uvedené výsledky simulácií a meraní, ďalej obsahuje výpočty chladenia a návrhy dosiek plošných spojov.

Kľúčové slová

spínaný zdroj, lineárny zdroj, regulácia napätia, mikrokontrolér, LCD

Abstract

This bachelor thesis deals with designing and construction of triple laboratory power supply. There are three outputs in the device. One of them is built with switching regulator LTM4605 and it's output voltage can be regulated in the range of 0 to 6 volts. Maximal output current is 5A. The other two outputs are realized as linear with voltage regulated output of 0 to 30V and adjustable current limitattions in range of 0 to 3 A. Output parameters are registered by a pair of microcontrollers and shown on two LCD displays. The results of simulations and measurements are also presented in the thesis, as well as the calculations and design of printed circuit boards.

Key words

switching power supply, linear power supply, voltage regulation, microcontroller, LCD

Bibliografická citácia

GERBEL, P. *Návrh trojitého laboratorního napájecího zdroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 50 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc..

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému Návrh trojitého laboratórneho napájacieho zdroja som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho semestrálneho projektu a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tohoto semestrálneho projektu som neporušil autorská práva tretích osôb, ani som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/nebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúceho zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 29.5.2017

.....

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu mojej semestrálnej práce prof. Ing. Lubomírovi Brančíkovi, CSc. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej semestrálnej práce.

OBSAH

ÚVOD.....	10
1 LINEÁRNE NAPÁJACIE ZDROJE.....	11
1.1 Vysvetlenie základných pojmov	11
1.2 Transformátor.....	11
1.3 Usmerňovače.....	11
1.3.1 Typy usmerňovačov.....	11
1.3.1.1 Jednocestný usmerňovač.....	12
1.3.1.2 Dvojcestný usmerňovač.....	12
1.3.1.3 Mostíkový (Gratz) usmerňovač	13
1.3.1.4 Zdvojovač (Greinacherov).....	13
1.3.1.5 Násobič napätia	14
1.4 Filter	14
1.5 Stabilizátory	14
1.5.1 Parametrické stabilizátory.....	14
1.5.2 Lineárne stabilizátory.....	15
2 SPÍNANÉ NAPÁJACIE ZDROJE.....	16
2.1 Spínané zdroje s transformátorom.....	17
2.1.1 Priepustný menič (Forward)	17
2.1.2 Akumulačný menič (Flyback).....	18
2.2 Dvojčinné meniče s transformátorom	19
2.2.1 Dvojčinné zapojenie (Push - Pull)	19
2.2.2 Mostíkové zapojenie – polomost (halfbridge)	20
2.2.3 Mostíkové zapojenie – plný most (full bridge).....	21
3 NÁVRH ZDROJA.....	22
3.1 Návrh spínaného zdroja.....	23
3.1.1 Regulátor LTM4605	23

3.1.2	Regulácia výstupného napätia, maximálny výstupný prúd.....	25
3.2	Návrh lineárneho zdroja	26
3.2.1	Operačný zosilňovač TL082	26
3.2.2	Schéma zapojenia.....	27
3.2.3	Popis zapojenia	27
3.2.4	Simulácia zapojenia	28
3.2.4.1	Simulácia zaťažovacej charakteristiky.....	30
3.3	Zobrazovacie prvky	31
3.3.1	Návrh zapojenia mikrokontroléra	31
3.3.1.1	Schéma zapojenia.....	31
3.3.1.2	Popis zapojenia	31
3.4	Spínanie ventilátorov a regulácia ich otáčok.....	32
3.5	Napájanie zdrojov, obvod pomocných napätí	33
3.5.1	Schéma zapojenia.....	33
3.5.2	Návrh transformátorov	34
3.5.2.1	Návrh transformátoru pre lineárne zdroje	34
3.5.2.2	Návrh transformátoru pre spínaný zdroj a ostatné obvody	34
3.5.3	Obvod pomocných napätí	35
4	NÁVRH CHLADENIA.....	36
5	MERANIE	37
5.1	Meranie zaťažovacích charakteristík pri konštantnom napätí.....	37
5.1.1	Výpočet vnútorného odporu zdrojov	39
5.2	Meranie zaťažovacích charakteristík pri konštantnom prúde	40
5.3	Voltampérová charakteristika zdroja	41
5.4	Zvlnenie výstupného napätia a prúdu.....	42
5.5	Účinnosť	43
6	NÁVRH A REALIZÁCIA DOSIEK PLOŠNÝCH SPOJOV	45

6.1	Lineárny zdroj	45
6.2	Spínaný zdroj.....	45
6.3	Meracie panely	45
6.3.1	Návrh predného panelu	45
	ZÁVER	46
	LITERATÚRA	47
	ZOZNAM OBRÁZKOV	48
	ZOZNAM TABULIEK	49
	ZOZNAM GRAFOV	49
	ZOZNAM PRÍLOH	50

ÚVOD

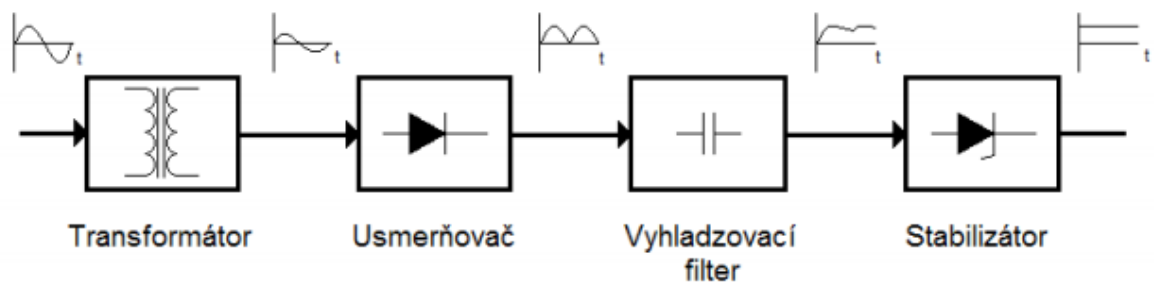
Cieľom tejto bakalárskej práce je návrh trojitého laboratórneho napájacieho zdroja. Napájacie zdroje sú veľmi dôležité pre každé elektronické zariadenie, používajú sa ako zdroj energie. Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom takéhoto zdroja, ktorý sa bude využívať hlavne pri oživovaní zariadení v nízkofrekvenčnej technike. Pri laboratórnych zdrojoch sa kladie dôraz hlavne na to, aby ich výstupné napätie malo čo najmenšie zvlnenie, čo najvyššiu stabilitu a rýchle reakcie na zmenu záťaže. Táto práca obsahuje návrh a realizáciu spínaného a lineárnych zdrojov, takže demonštruje ich jednotlivé výhody a nevýhody.

V prvej časti sú popísané vlastnosti a princípy zapojení lineárnych a spínaných zdrojov. Následne sú v ďalšej časti navrhnuté konkrétne riešenia zadania bakalárskej práce pre jednotlivé zdroje a sú popísané spôsoby ich riadenia s prevedenými simuláciami zapojení. Nasleduje kapitola venovaná chladeniu výkonových prvkov a v poslednej kapitole sú zdroje detailne premerané, z nameraných hodnôt sú zostrojené závislosti a vypočítané niektoré dôležité parametre zdrojov.

1 LINEÁRNE NAPÁJACIE ZDROJE

1.1 Vysvetlenie základných pojmov

Lineárny napájací zdroj, ktorého bloková schéma je na Obr.1 pozostáva zo štyroch základných blokov a to transformátoru, usmerňovača, vyhladzovacieho filtra a stabilizátoru.



Obr. 1:Principiálna bloková schéma lineárneho zdroja

1.2 Transformátor

Hlavnou výhodou je, že nám galvanicky oddeľuje výstupné napätie od rozvodnej siete. Transformátor funguje tak, že striedavý prúd v primárnom obvode vytvára premenlivé magnetické pole, ktoré následne indukuje striedavé napätie sekundárnom obvode. Transformátory používané v lineárnych zdrojoch sú väčšinou konštruované na sieťový kmitočet 50Hz, najpoužívanejšie typy jadier sú toroidné alebo vo vyhotovení z EI plechmi.

1.3 Usmerňovače

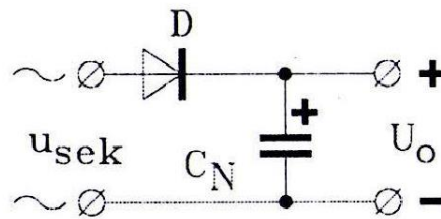
Úlohou usmerňovača je prevod striedavého napätia na jednosmerné.

1.3.1 Typy usmerňovačov

V slaboprúdových zariadeniach sa v oblasti napájacích zdrojov ustálilo použitie niekoľko základných druhov zapojenia usmerňovačov podľa požadovaných napätí prúdov a zvlnenia. Všetky tieto typy zapojenia sa používajú hlavne s nabíjacím kondenzátorom [3].

1.3.1.1 Jednocestný usmerňovač

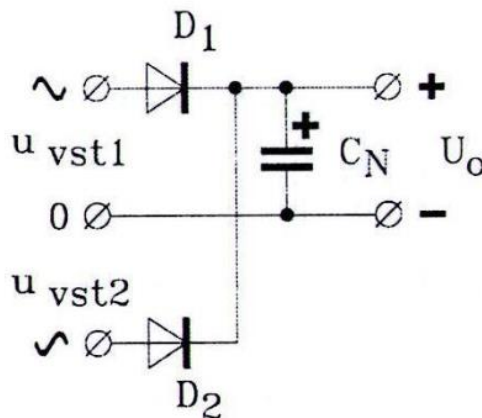
Podľa použitia polarizácie diódy prepustí jednocestný usmerňovač iba jednu polvlnu vstupného striedavého napätia, je vhodný pre vysoké výstupné napätia a malé výstupné prúdy, zvlnenie na výstupe je veľké.



Obr. 2: Jednocestný usmerňovač s nabíjacím kondenzátorom (Prevzaté z [3])

1.3.1.2 Dvojcestný usmerňovač

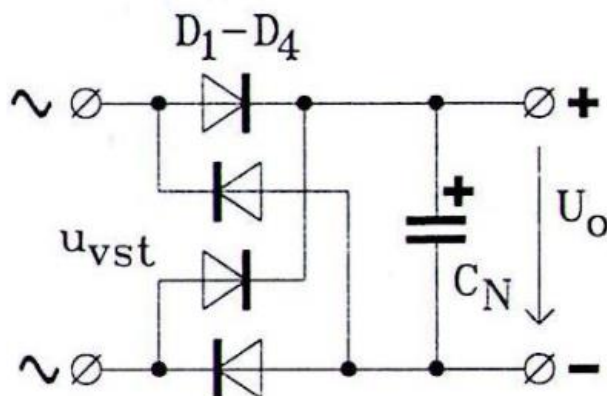
Jednou diódou tečie iba polovica výstupného jednosmerného prúdu, rozhodujúca je stredná hodnota prúdu diódou za dobu periódy, ta spôsobuje výkonové namáhanie diódy. Prúdovo sú diódy mnohonásobne preťažiteľné, je vhodný pre veľké výstupné prúdy a malé výstupné napätia, zvlnenie na výstupe je malé.



Obr. 3: Jednocestný usmerňovač s nabíjacím kondenzátorom (Prevzaté z [3])

1.3.1.3 Mostíkový (Gratz) usmerňovač

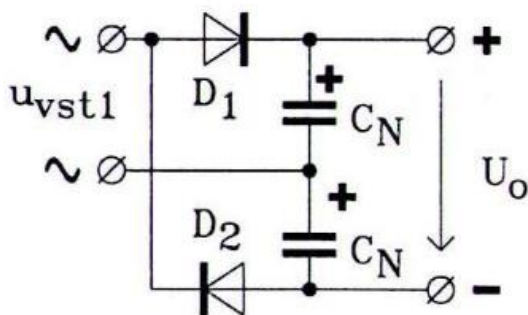
Jeho výhodou je možnosť použitia iba jedného sekundárneho vinutia transformátoru pri zanedbaní jednosmernej magnetizácii jeho jadra [3]. Usmernené napätie na výstupe má rovnaký priebeh ako pri dvojcestnom usmerňovači ale výstupné napätie je zmenšené o úbytok napätia na dvoch diódach, je vhodný pre veľké výstupné prúdy a stredne veľké výstupné napätia, zvlnenie na výstupe je malé.



Obr. 4: Mostíkový usmerňovač s nabíjacím kondenzátorom (Prevzaté z [3])

1.3.1.4 Zdvojovač (Greinacherov)

Zapojenie obsahuje dva jednocestné usmerňovače na vstupe zapojené paralelne a na výstupe sériovo. Zdvojovač zaťažuje transformátor symetricky a nevzniká teda jednosmerné sýtenie jeho jadra. Zdvojovač je vhodný pre vysoké výstupné napätia a malé výstupné prúdy, zvlnenie na výstupe je veľké [3].



Obr. 5: Mostíkový usmerňovač s nabíjacím kondenzátorom (Prevzaté z [3])

1.3.1.5 Násobič napätia

Je možné ho realizovať opakovaním jednotlivých typov usmerňovačov tak, aby z hľadiska striedavého napájania boli všetky ich stupne spojené paralelne a z hľadiska výstupných jednosmerných napätí boli ich výstupy v sérii. Takýmto násobičom sa hovorí kaskádne a sú odvodené z jednotlivých typov usmerňovačov.

1.4 Filter

Najčastejšie ho tvorí elektrolytický kondenzátor s vysokou kapacitou. Jeho úlohou je akumulovať energiu pod dobu keď je napätie privádzané na filter nižšie ako požadované napätie na výstupe filtra. Potrebná veľkosť kapacity filtračného kondenzátora sa dá vypočítať podľa vzťahu (1.1).

$$C = \frac{k \cdot I_{OUT}}{p \cdot U_{OUT}} \text{ [F]}, \quad (1.1)$$

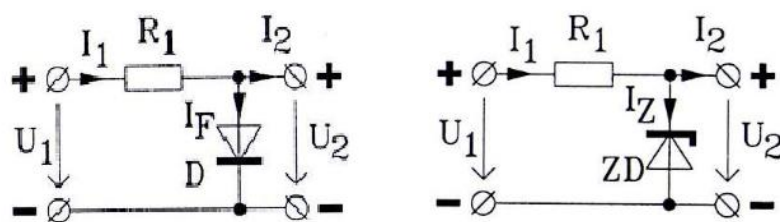
Konštanta k je pre jednocestné usmernenie 300 a pre dvojcestné 600, I_{OUT} [A] je výstupný prúd, p je požadovaná hodnota výstupného zvlnenia a U_{OUT} [V] je výstupné napätie [1].

1.5 Stabilizátory

Medzi stabilizátory je možné zaradiť všetky obvody, ktoré umožňujú stabilizovať výstupné napätie alebo prúd pri zmene výstupného (zaťažovacieho) prúdu, vstupného (zvyčajne sieťového) napätia a teploty okolia [1].

1.5.1 Parametrické stabilizátory

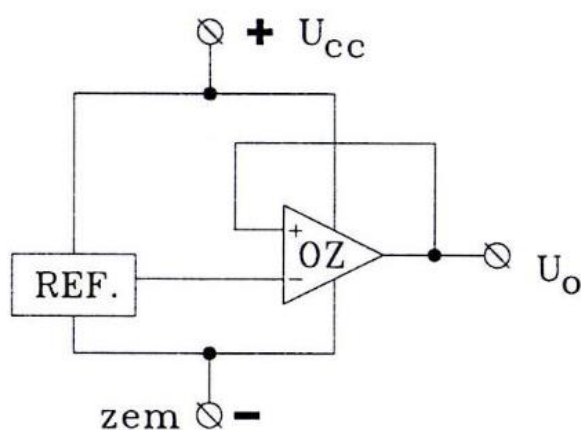
Ich funkcia je založená na rozdiely medzi jednosmerným a dynamickým odporom stabilizačného prvku v jeho pracovnom bode. Pokiaľ je v pracovnom bode dynamickým odpor menší než odpor jednosmerný, ide o stabilizátor napätia (dióda v priepustnom smere, Zenerova dióda). Ak je jednosmerný odpor vyšší než dynamický ide o stabilizátor prúdu. Najjednoduchším zapojením je stabilizátor s diódou alebo zo Zenerovou diódou [3].



Obr. 6: Stabilizátor s diódou, stabilizátor so Zenerovou diódou (Prevzaté z [3])

1.5.2 Lineárne stabilizátory

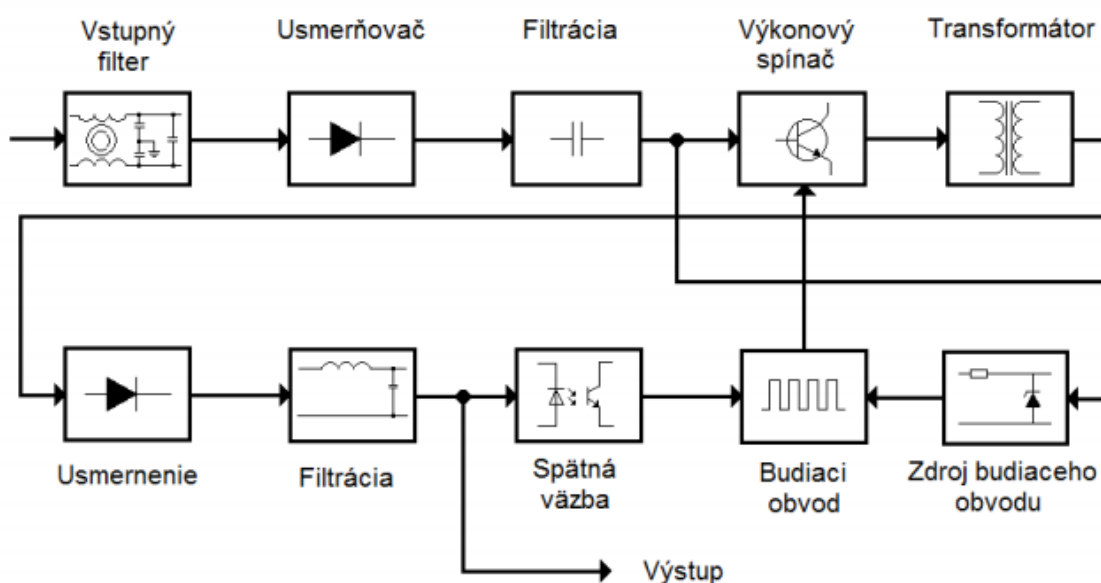
Skladá sa zo stabilnej referencie, ktorej výstupom je U_{REF} a zosilňovač regulačnej odchýlky s vysokým zosilnením. Výstupné napätie U_0 je buď rovnaké ako referenčné alebo jeho násobkom (podielom). Stabilizátor má snahu udržiavať výstupné napätie U_0 konštantné, pri zmene U_0 sa snaží jeho hodnotu vrátiť na pôvodnú. Ideálny stabilizátor napätia sa teda chová ako ideálny zdroj napätia s konštantným výstupným napätím a nulovým vnútorným odporom.



Obr. 7: Bloková schéma stabilizátoru napätia (Prevzaté z [3])

2 SPÍNANÉ NAPÁJACIE ZDROJE

Spínaný zdroj, ktorého bloková schéma je zobrazená na Obr.8 pozostáva z viacerých členov. Na vstupe takéhoto spínaného zdroja je umiestnený vstupný širokopásmový filter, ktorý odfiltruje rušivé signály z rozvodnej siete vstupujúce do zdroja a zároveň zabraňuje prieniku vyšších harmonických zložiek od zdroja späť do siete. Napätie je následne usmernené, najčastejšie sa používa mostíkový usmerňovač a vyfiltrované kondenzátorom s vysokou kapacitou. Výkonový spínač (tranzistor) je spínaný konštantným kmitočtom a je riadeným zmenou stiedy signálu (PWM) z budiaceho obvodu, napätie je ďalej privedené na impulzný transformátor, ktorý pracuje s kmitočtom až stovky kHz a transformuje napätie na nami požadovanú hodnotu. Na následné usmernenie je použitá zvyčajne schottkyho dióda, kvôli vysokému kmitočtu a filter je tvorený do série zapojenou tlmivkou a paralelne zapojeným kondenzátorom, pre lepšiu stabilizáciu je do obvodu ešte zaradená spätná väzba.



Obr. 8: Principiálna bloková schéma spínaného zdroja

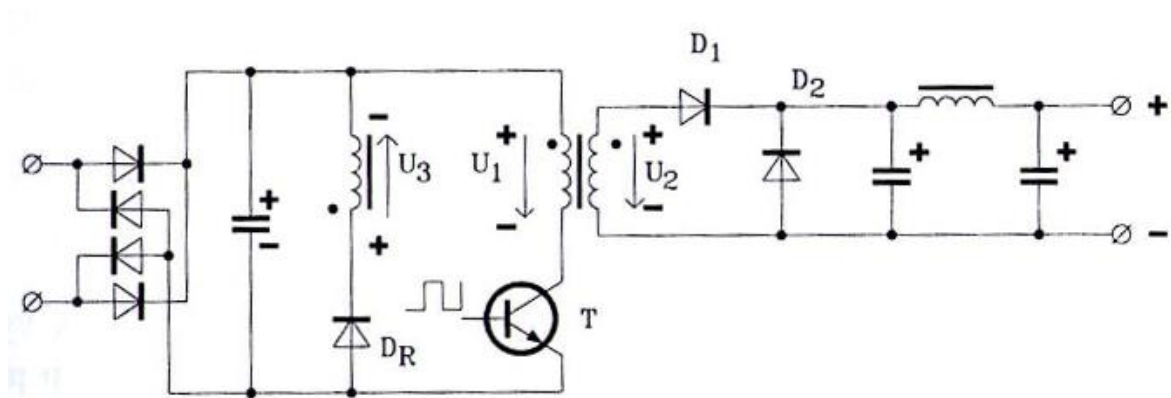
2.1 Spínané zdroje s transformátorom

Spínané zdroje s transformátorom používame ak požadujeme galvanické oddelenie výstupného napätia od vstupného alebo viac výstupných napätí ktoré sú od seba galvanicky izolované. Toto zapojenie je vhodné ak potrebujeme vyšší výstupný výkon, ich nevýhoda je hlavne jednosmerné sýtenie magnetického jadra, ktoré neumožňuje využívať celú plochu ich hysteréznej slučky [4].

2.1.1 Priepustný menič (Forward)

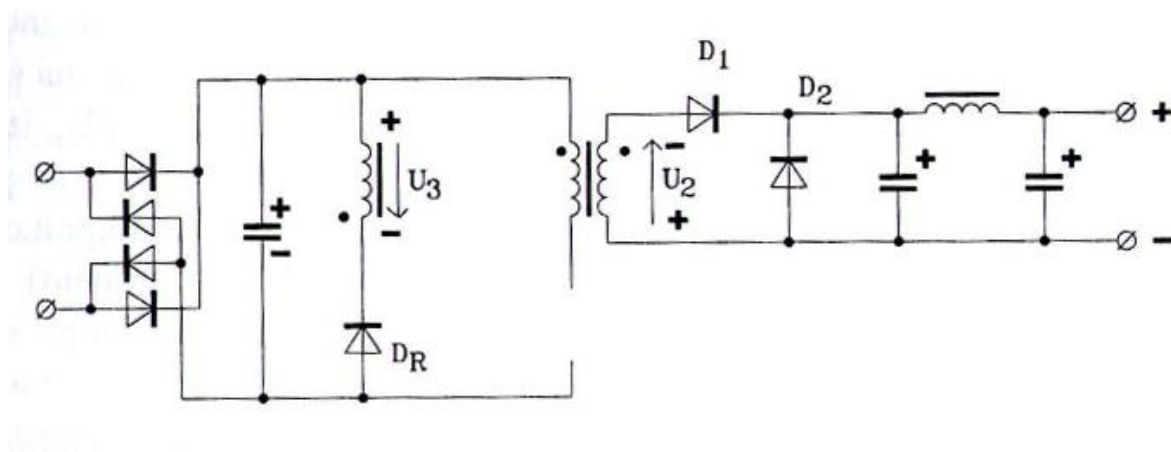
Je charakterizovaný priamym prenosom energie cez transformátor, ak tečie prúd primárnym vinutím v okamžiku zopnutia spínača, tečie súčasne aj sekundárnym vinutím. Je to určené vzájomnou polaritou primárneho a sekundárneho vinutia a polaritou výstupnej diódy [3].

V okamihu zopnutia tranzistoru T na obr. 9, začne lineárne narastať prúd tečúci vinutím 1, na tomto vinutí je napätie U_1 v naznačenej polarite. Pretože je sekundárne a primárne vinutie polarizované rovnako je indukované napätie takej polarity, že ho môže dióda D_1 usmerniť, diódou tečie prúd. Súčasne je indukované kladné napätie U_3 na vinutí 3. Toto napätie nemôže vyvolať prechod prúdu vplyvom polarizácie diódy D_R [3].



Obr. 9: Priepustné zapojenie, zopnutý tranzistor (Prevzaté z [3])

V okamžiku rozopnutia tranzistoru T na obr. 10, indukuje pokles prúdu vinutím 1 napätie do vinutia 2 a 3 v naznačenej polarite. Napätie U_3 je takej polarity, že D_R je v tomto okamihu vodivá. Dióda D_2 umožňuje prietok výstupného prúdu z tlmičky do záťaže v dobre rozopnutého tranzistoru T, kedy diódou D_1 netečie prúd [3].

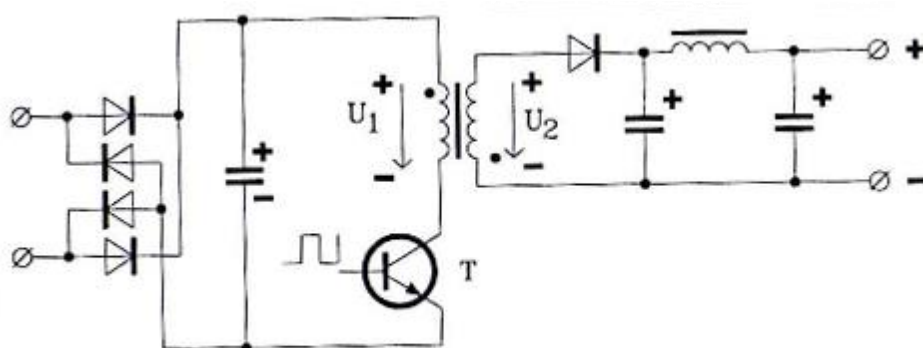


Obr. 10: Priepustné zapojenie, rozopnutý tranzistor (Prevzaté z [3])

2.1.2 Akumulačný menič (Flyback)

Ak tečie vstupným vinutím prúd, je sekundárne vinutie vzhľadom k polarite výstupnej diódy polarizované tak, že prúd netečie. Všetka energia je uložená v magnetickom poli transformátora a až po ukončení prúdu primárnym vinutím začína pretekať prúd sekundárnym vinutím [3].

Primárne vinutie na ktorom je napätie U_1 , je vinuté opačným smerom než vinutie sekundárne s napätím U_2 , na obr. 11 je polarita vstupného napätia U_1 vyznačená pre zopnutý tranzistor T a polarita výstupného napätia U_2 pre rozopnutý tranzistor T. Ak tečie prúd primárnym vinutím pri zopnutom tranzistore T, nemôže súčasne tiecť prúd vinutím sekundárnym pretože dióda je polarizovaná záverne. Pri rozopnutí kolektorového prúdu tranzistoru T sa naindukujú napätie U_2 v opačnej polarite, výstupná dióda je priepustná a vinutím tečie prúd [3].



Obr. 11: Akumulačné zapojenie (Prevzaté z [3])

Pre tento typ spínaného zdroja je podstatný režim jeho činnosti, v ktorom sa nachádza. Pokiaľ zaťažovací prúd klesá pod istú hranicu, tak sa znižuje uhol otvorenia tranzistoru a pri malej hodnote indukčnosti primárnej cievky tranzistoru narastá amplitúda prúdu. Ak prekročí zaťažovací prúd uvedenú hodnotu, tak tečie prúd tranzistorom po celú dobu jeho otvorenia a výrazne klesá jeho špičkové prúdové namáhanie [3].

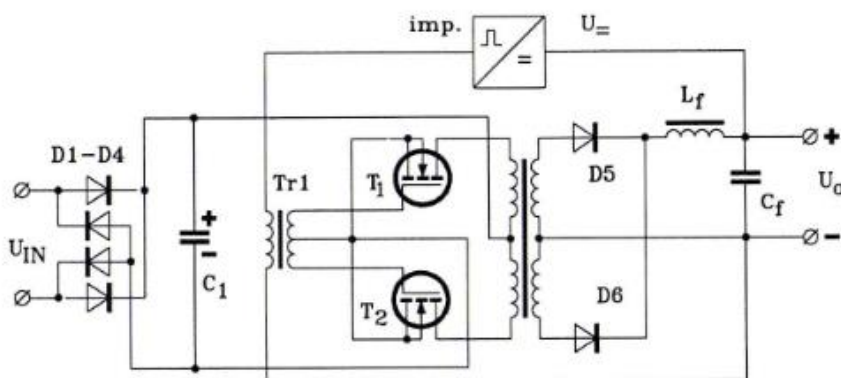
2.2 Dvojčinné meniče s transformátorom

Pridaním ďalšieho vinutia transformátoru a jeho použitia na sekundárnej strane pre dvojcestný usmerňovač a na primárnej strane pre striedavé budenie vznikne dvojčinné zapojenie. Tieto meniče sa používajú pre vysoké výstupné výkony [4].

2.2.1 Dvojčinné zapojenie (Push - Pull)

Základným zapojením dvojčinného meniča je vlastne kombinácia zapojenia dvoch jednočinných meničov spojených jedným magnetickým obvodom spoločného transformátoru, ktoré sú riadené protitaktne [4].

V zapojení na obr. 12 je z výstupného napätia vyfiltrovaného členom L_f a C_f odoberaná informácia o veľkosti tohto napätia a je privádzaná do integrovaného prevodníku napätie / impulzy. Týmto impulzami je buďený transformátor Tr1, ktorý ich pomocou dvoch sekundárnych vinutí rozdeľuje pre oba tranzistory, tieto pulzy sú pre jeden tranzistor kladné a pre druhý záporné. Oba tranzistory sú typu NMOS s indukovaným kanálom, takže kladným impulzom medzi riadiacu elektródu a substrátom (emitorom) sa kanál vytvára a záporným napätím u druhého tranzistoru nevzniká [3].



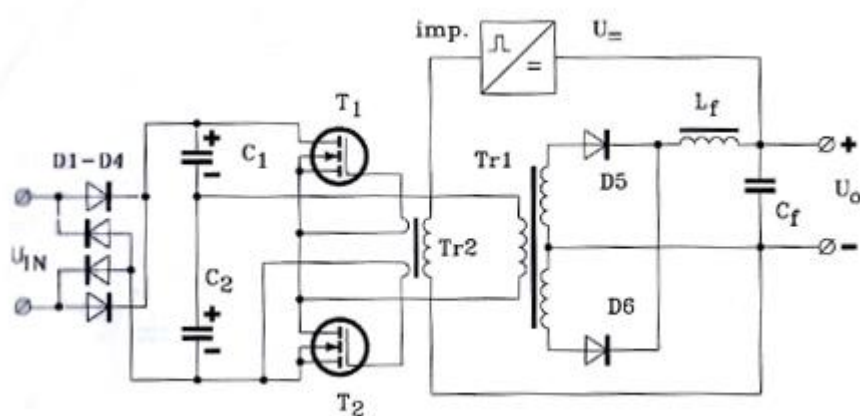
Obr. 12: Dvojčinné zapojenie (Prevzaté z [3])

Výhodou tohto zapojenia je hlavne dvojnásobný kmitočet zvlnenia na výstupe vzhľadom k spínaciemu kmitočtu obvodu, takže je možné použiť 4x menšiu indukčnosť cievky L_f výstupného filtra [4].

2.2.2 Mostíkové zapojenie – polomost (halfbridge)

Mostíkové zapojenia sa delia podľa usporiadania jednotlivých prvkov v moste. U polomostu je polovica mostu tvorená dvoma spínacími tranzistormi a druhá polovica dvoma kondenzátormi.

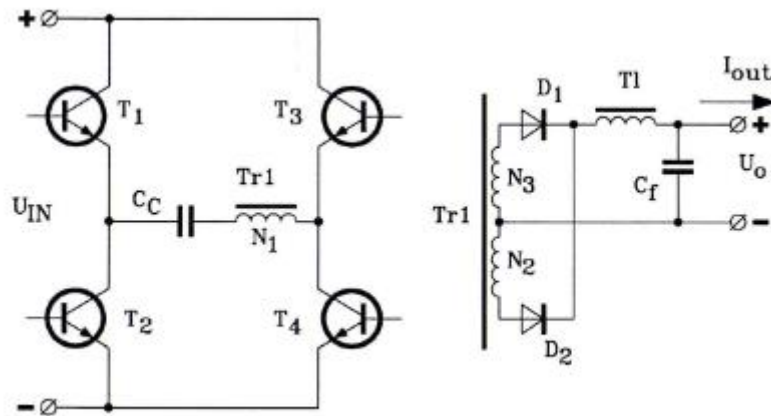
Zapojenie polomostu s tranzistormi NMOS je na obr. 13, vstupné napätie je usmernené mostíkovým usmerňovačom s deleným nabíjacím kondenzátorom. Tieto dva kondenzátory C_1 a C_2 tvoria ľavú vetvu mostu, pravú tvoria dva spínacie tranzistory NMOS a v uhlopriečke mostu je zapojené primárne vinutie transformátoru Tr_1 . Z výstupného napätia je napájaný prevodník napätie / impulzy, ktorý budí pomocný impulzný transformátor Tr_2 . Na jeho sekundári sú dve opačne polarizované vinutia zapojené medzi riadiace elektródy a emitory oboch tranzistorov. Pri kladnom impulze na vstupnom vinutí Tr_2 sa indukuje kladný impulz na hornom sekundárnom vinutí a tranzistor T_1 spína, na opačne polarizovanom spodnom vinutí sa indukuje záporný impulz a T_2 zostáva rozopnutý. Pri zápornej pol perióde vstupného napätia pomocného tranzistoru Tr_2 sa indukujú obe napätia s opačnou polaritou a tranzistor T_1 zostáva rozopnutý a T_2 spína.



Obr. 13: Mostíkové zapojenie, polomost (Prevzaté z [3])

2.2.3 Mostíkové zapojenie – plný most (full bridge)

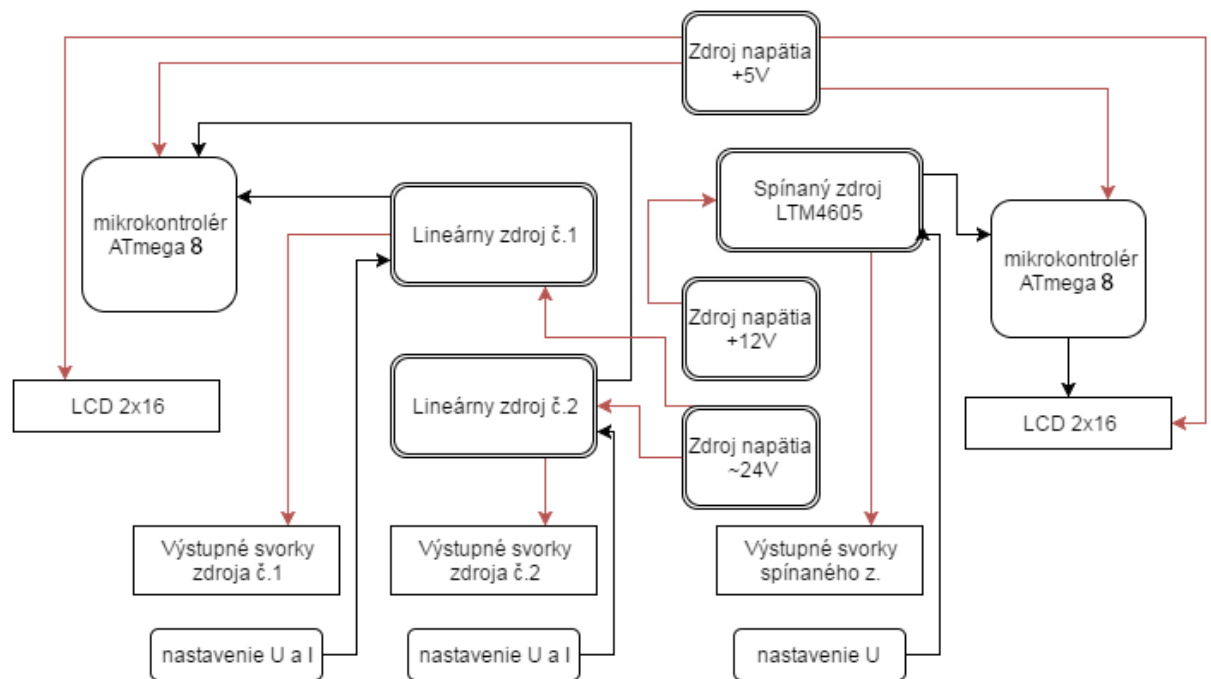
Zapojenie je veľmi podobné zapojeniu polomostu, kondenzátory C_1 a C_2 boli nahradené ďalšou dvojicou spínacích tranzistorov, tým dostávame skutočne tvrdý zdroj a dosahujeme vysokých výkonov.



Obr. 14: Mostíkové zapojenie, plný most (Prevzaté z [3])

3 NÁVRH ZDROJA

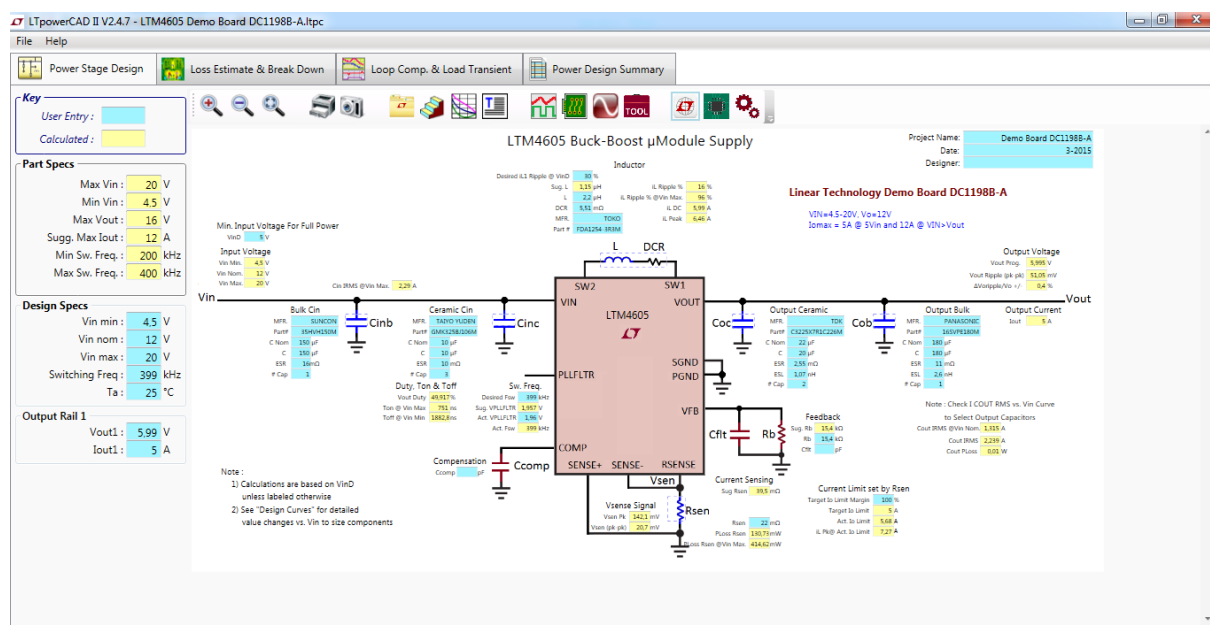
Bloková schéma ukazuje celkový návrh trojitého laboratórneho napájacieho zdroja, jednotlivé bloky a ich funkcie budú popísané v nasledujúcich podkapitolách.



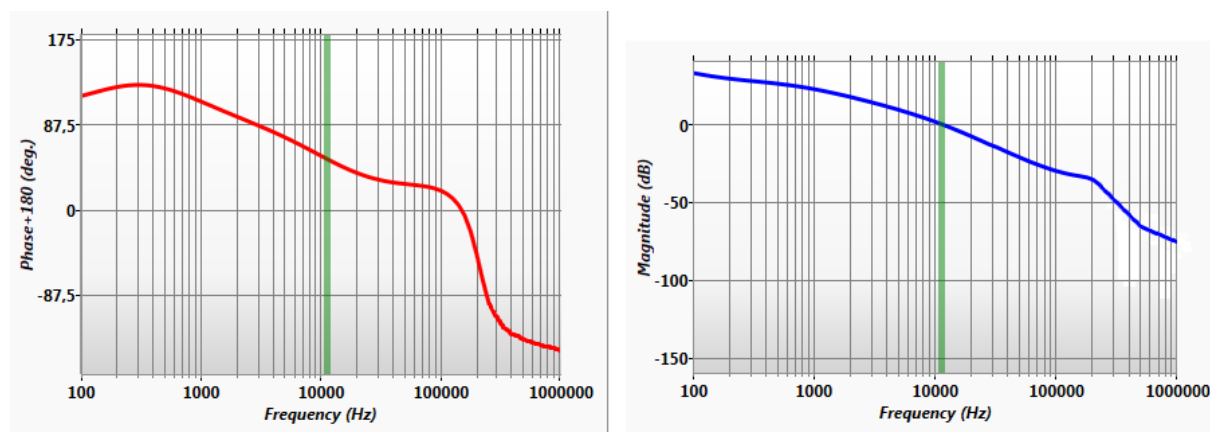
Obr. 15: Bloková schéma zapojenia

V blokovej schéme môžeme vidieť že zdroj obsahuje tri výstupy, z toho dva s výstupným napätím 0-30V a výstupným prúdom 0-3A realizované ako lineárny zdroj, v celej práci označované ako zdroj1 a zdroj2, tretí výstup má parametre 0-6V/5A, je realizovaný spínaným zdrojom, v práci označovaný ako zdroj3.

Hodnoty súčiastok boli zvolené podľa odporúčaní výrobcu v [5] a následne boli v programe LTpowerCAD II obr. 18, upravené tak aby bola zabezpečená stabilita obvodu obr. 19, teda aby celkový prenos nebol 0dB a celková fáza -360° tým by došlo k rozkmitaniu výstupného napätia.



Obr. 18: Návrhový software LTpowerCAD II, simulácia obvodu LTM 4605



Obr. 19: Fázová a prenosová frekvenčná charakteristika pre výstupné napätie 5,99V a výstupný prúd 6A

Pri použití vstupného napätia 12V, výstupného 0-6V a maximálnom výstupnom prúde 5A bude regulátor pracovať v režime buck, teda ako znižujúci menič.

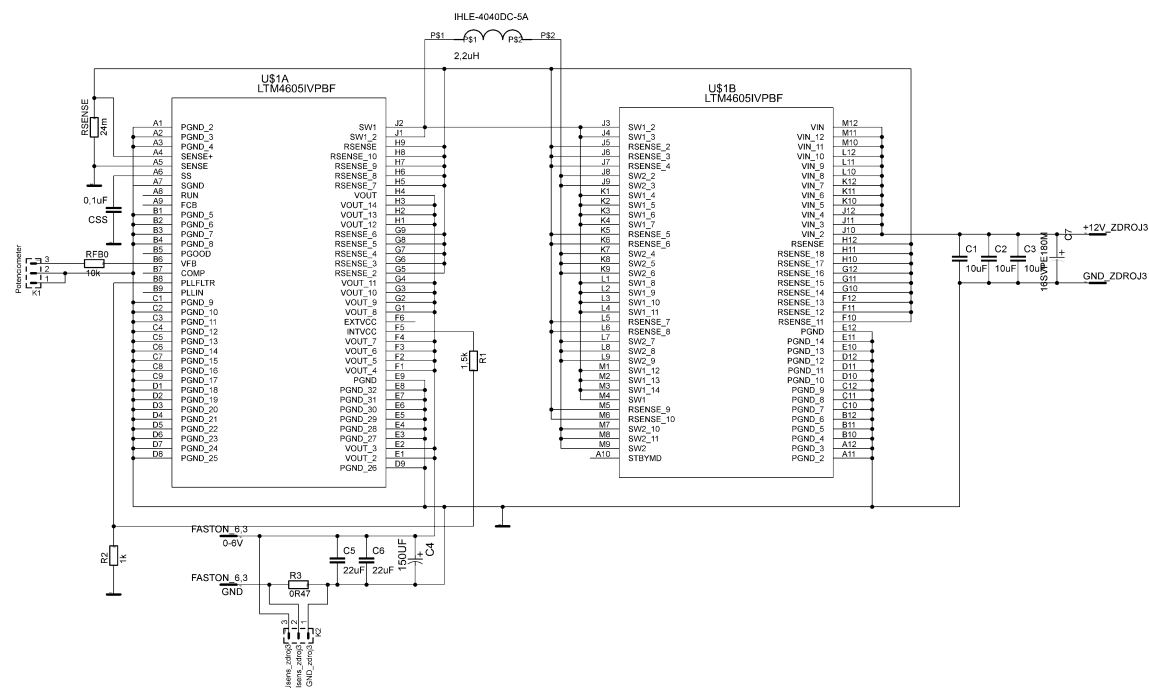
3.1.2 Regulácia výstupného napätia, maximálny výstupný prúd

Výstupné napätie je možné regulovať pripojením potenciometru P_{FB} medzi pin V_{FB} regulátoru a pin $SGND$, odpor tohto potenciometra sa vypočíta na základe požadovaného maximálneho výstupného napätia V_{OUT} podľa vzťah.

$$V_{OUT} = 0,8 * \frac{100000 + R_{FB}}{R_{FB}} [V] \quad (4.1)$$

Pre maximálne výstupné napätie 6V, do série s potenciometrom R_{FB} zapojíme rezistor R_{FB0} s hodnotou odporu 10k Ω .

Nastavenie maximálneho výstupného prúdu sa realizuje zapojením rezistoru R_{SENSE} spôsobom zobrazeným na obr. 20, jeho hodnota bola určená v návrhovom programe LTpowerCAD II.



Obr. 20: Schéma zapojenia spínaného regulátora LTM4605

Privedením napätia väčšieho ako 2.4V na pin $PLLFLTR$ bola nastavená frekvencia spínania na 400kHz.

3.2 Návrh lineárneho zdroja

Základné zapojenie lineárneho zdroja využívajúceho operačné zosilňovače TL082 bolo prevzaté z [6]. Výstupné napätie je možné regulovať v rozsahu 0-30V a prúdové obmedzenie nastaviť v rozsahu 0-3A.

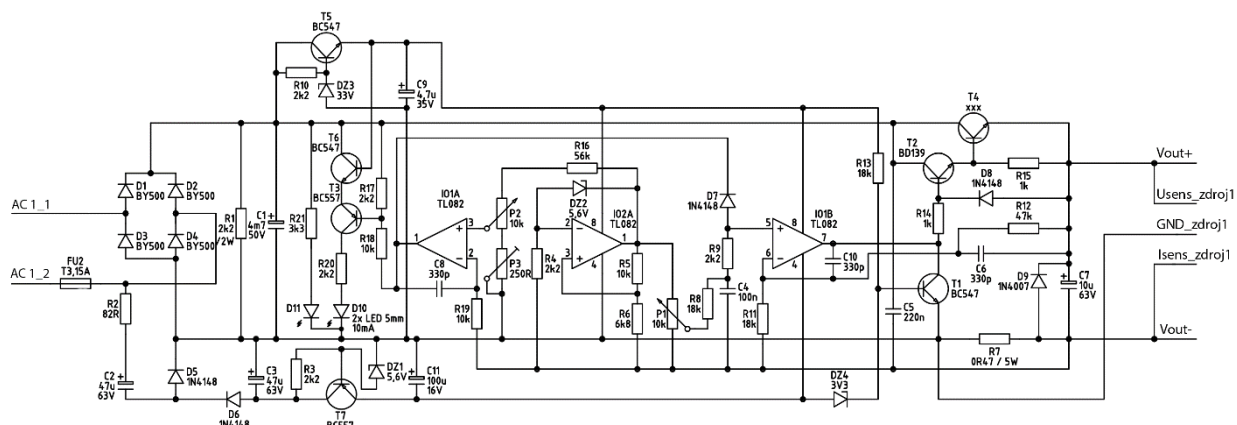
3.2.1 Operačný zosilňovač TL082

TL082 je dvojité unipolárny operačný zosilňovač využívajúci tranzistory JFET, je napájaný jednosmerným symetrickým napätím s maximálnou hodnotou $\pm 18\text{V}$ [7]. Jeho základné parametre sú uvedené v tab. 1.

Tab. 1: Základné parametre obvodu TL082 (Prevzaté z [7])

Parameter	Podmienka	Min	Typ	Max	Jednotka
Napájacie napätie				± 18	V
Prúdový odber	$R_S = 10\text{ k}\Omega$, $T_A = 25^\circ\text{C}$		5	15	mV
Maximálne vstupné napätie				± 30	V
Rozsah pracovnej teploty		0		70	$^\circ\text{C}$
Vstupná impedancia	$T_j = 25^\circ\text{C}$		10^{12}		Ω

3.2.2 Schéma zapojenia



Obr. 21: Schéma zapojenia lineárneho zdroja (Prevzaté z [6])

Kompletná schéma zapojenia je umiestnená v prílohe A.1.

3.2.3 Popis zapojenia

Striedavé napätie zo vstupu V_{IN} je usmernené diódami D1-D4 a vyhladené filtračným obvodom tvoreným elektrolytickým kondenzátorom C1 a odporom R1. Súčiastky DZ3, R10, T5, C9 tvoria obmedzovač napätia pre napájanie kladnej vetvy operačných zosilňovačov. Obvody okolo IO2A tvoria referenčné napätie pre stabilitu zapojenia. Zenerova dióda DZ2 pracuje s minimálnym prúdom, aby sa obmedzilo jej zahrievanie na najmenšiu možnú mieru, a tým sa zaistila stabilita zapojenia. Rezistory R5 a R6 nastavujú referenčné napätie na 9,4V [6].

Výstupné napätie operačného zosilňovača IO2A sa ustáli na takej hodnote, aby bolo napätie medzi jeho vstupmi 2 a 3 nulové. Na rezistore R5 sa vytvorí teda rovnaké napätie ako na zenerovej dióde – 5,6V. Pretože prúd z rezistora R5 preteká tiež cez rezistor R6, je výstupné napätie operačného zosilňovača rovné súčtu napätí na R5 a R6. IO1B s rezistormi R11 a R12 zosilňuje napätie 3,61x podľa vzťahu (4.2) a zvyšuje tak napätie z 9,4V na 33,9V [6].

$$A = \frac{R_{11} + R_{12}}{R_{11}} [-] \quad (4.2)$$

Pokiaľ zdroj pracuje správne a je na výstupe pripojená záťaž, tak celý prúd preteká cez R7. Napätie z R7 je privedené cez R19 na invertujúci vstup IO1A, ktorý je zapojený ako komparátor. Na neinvertujúci vstup je privedené napätie z potenciometra P2, ktorý je možné nastaviť od 0 - 1,42V. Pokiaľ je napätie na invertujúcom vstupe menšie ako na neinvertujúcom, tak je na výstupe IO1A plné kladné napätie a dióda D7 je uzatvorená. Pokiaľ vzrastie prúd pretekajúci rezistorom R7 zväčší sa napätie na invertujúcom vstupe IO1A, ktorého výstup začne riadiť IO1B tak, aby sa výstupný prúd (a teda úbytok na R7) ďalej nezväčšoval. Prúd, od ktorého je závislé toto riadenie sa nastavuje potenciometrom P2, najmenší možný sa nastavuje trimrom P3. V tomto stave je celý regulátor prepnutý zo zdroja konštantného napätia na zdroj konštantného prúdu (výstupné napätie sa mení tak, aby záťažou pretekala konštantný prúd) a je tiež rozsvietená dióda D10, ktorá hlási prúdové preťaženie. Spätnoväzbovým kondenzátorom C8 je dosiahnutá potrebná stabilita IO1A [6].

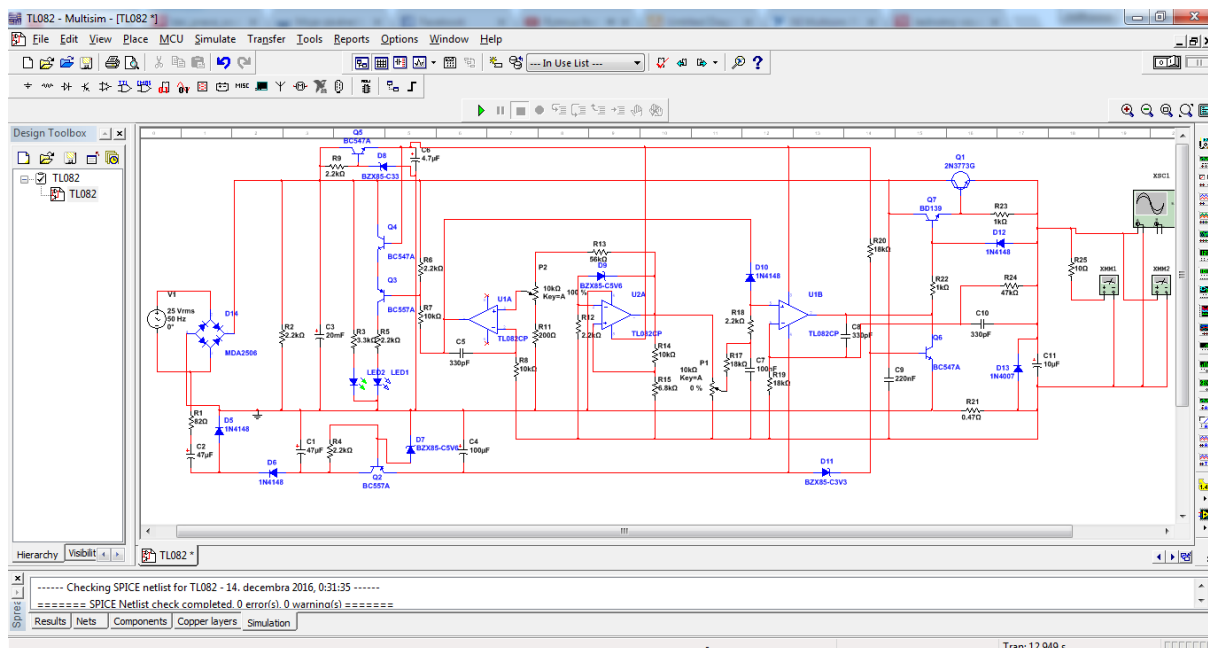
Tranzistor T6 slúži na zníženie napätia pre T3 tak, aby nebolo vyššie ako maximálne kladné výstupné napätie IO1. Z diód D2 a D4, cez rezistor R2 a obvod D5, D6, C2, C3 je získavané záporné napätie, ktoré je potrebné pre funkciu operačných zosilňovačov IO1A a IO1B, je stabilizované pomocou T7, R4 a DZ1 a napája vývod 4 IO1. Kondenzátory C4 a C5 blokujú vysokofrekvenčné rušenie, ktoré by mohlo narušiť funkciu operačných zosilňovačov [6].

Cez rezistor R14 je privádzané napätie na T2 a T4, ktoré pracujú v darlingtonovom zapojení. Rezistor R15 obmedzuje vplyv kludového prúdu tranzistora T2. Tranzistor T1 udržiava výstup zdroja na nulovej hodnote pri neprítomnosti záporného napájacieho napätia. Tým zabraňuje prechodovým javom pri zapínaní a vypínaní zdroja. Dióda DZ4 uzavrie tranzistor potom, čo nabehne záporné napájacie napätie pre operačné zosilňovače a zdroj začne pracovať v normálnom režime [6].

Dióda D11 signalizuje privedenie napätia na Vin, teda signalizuje zapnutie zdroja.

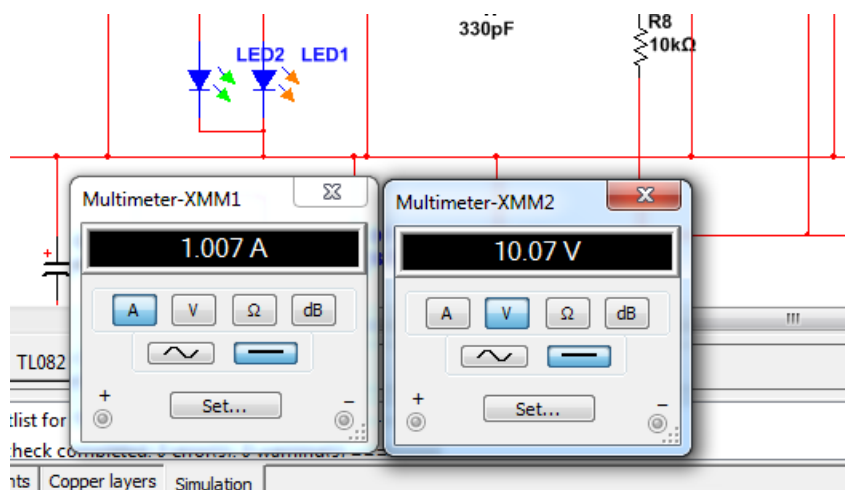
3.2.4 Simulácia zapojenia

Obvod bol simulovaný v prostredí Multisim od spoločnosti National Instruments. LED2 (obr. 23), v schéme na obr.21 označená ako D11 signalizuje že je na vstup Vin pripojené napätie.



Obr. 22: Program Multisim

Pre demonštráciu funkcie prúdového obmedzenia je na výstup pripojený zaťažovací rezistor s odporom 10Ω , prúdové obmedzenie je potenciometrom P2 nastavené na hodnotu 1A, znižovaním odporu potenciometra P1 zvyšujeme postupne výstupné napätie, pri 10V na výstupe sa aktivuje prúdové obmedzenie, to je signalizované rozsvietením LED1.



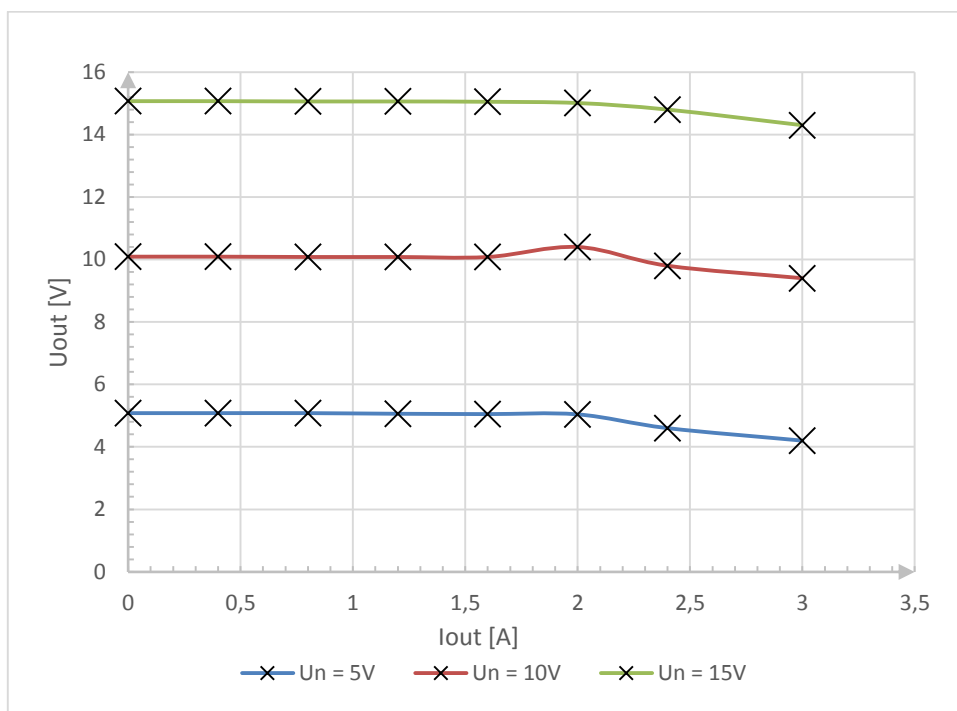
Obr. 23: Demonštrácia prúdového obmedzenia

3.2.4.1 Simulácia zaťažovacej charakteristiky

V programe Multisim boli postupne nastavené tri konštantné napätia U_N , pre každú z týchto hodnôt bol nastavovaný výstupný prúd záťažou v rozsahu 0 až 3A. Odsimulované hodnoty výstupného napätia V_{OUT} sú v nasledujúcej tabuľke a závislosť tohto napätia na výstupnom prúde sú zobrazené na obr. 24.

Tab. 2: Odsimulované hodnoty zaťažovacej charakteristiky

U_N	5	10	15
$I[A]$	U_{OUT}	U_{OUT}	U_{OUT}
0	5,08	10,09	15,07
0,4	5,08	10,09	15,07
0,8	5,08	10,08	15,06
1,2	5,06	10,08	15,06
1,6	5,05	10,08	15,05
2	5,04	10,4	15,01
2,4	4,6	9,8	14,8
3	4,2	9,4	14,3



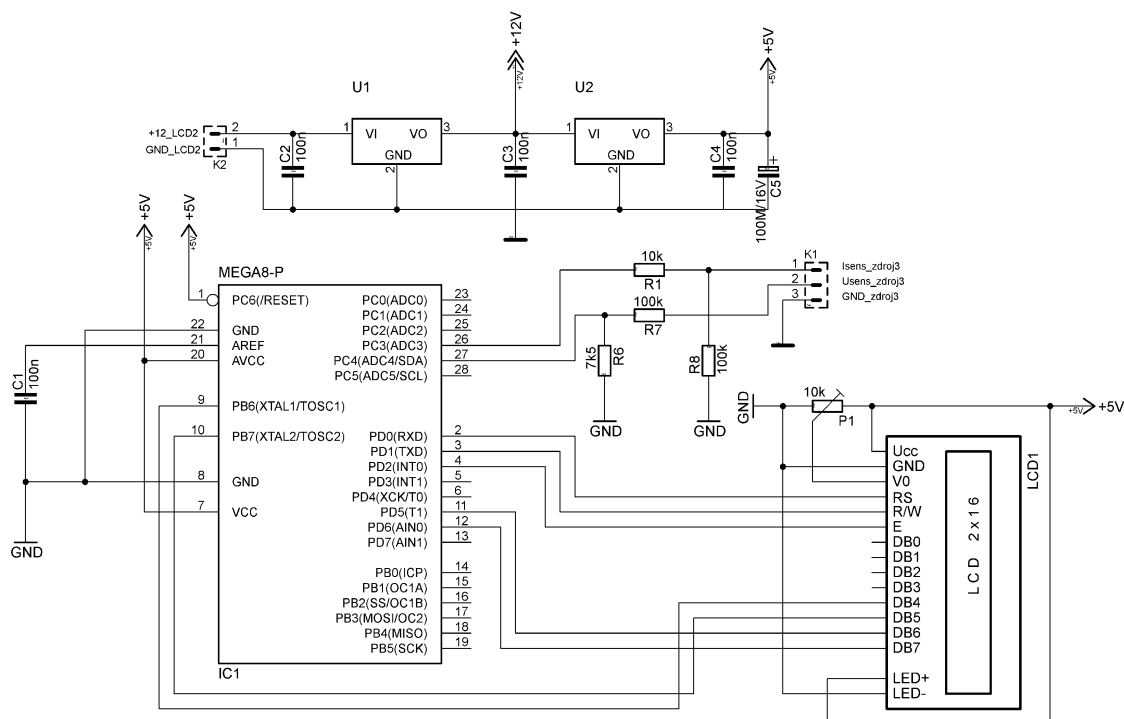
Graf 1: Simulovaná zaťažovacia charakteristika pri nastavenom konštantnom napätí

3.3 Zobrazovacie prvky

Na zobrazovanie výstupných hodnôt napätia a prúdu sú použité dva dvojriadkové 16-znakové LCD displeje, jeden pre dva výstupy lineárneho zdroja a jeden pre spínaný zdroj. Každý displej bude ovládaný mikroprocesorom Atmega8 od výrobcu ATMEL.

3.3.1 Návrh zapojenia mikrokontroléra

3.3.1.1 Schéma zapojenia



Obr. 24: Schéma zapojenia Atmega8 a LCD displeja pre spínaný zdroj

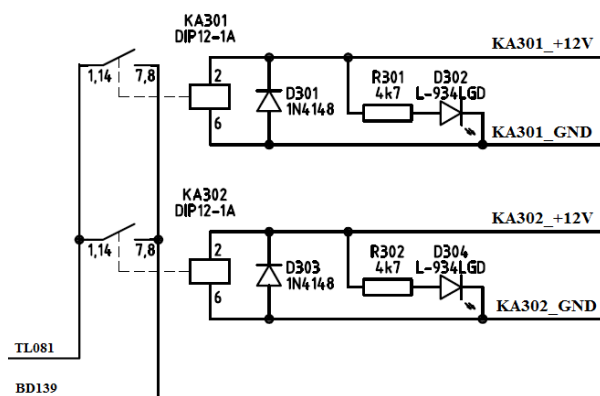
3.3.1.2 Popis zapojenia

Mikrokontrolér je napájaný nesymetrickým napätím +5V, na AD prevodníky na porte C sa privádzajú výstupy označené Usens, Isens a GND na obr.20. Prúd sa meria na prúdovom bočníku R3 (obr.20) a napätie sa meria na výstupných svorkách. Pre lineárne zdroje bol použitý rovnaký spôsob merania výstupných veličín, pretože lineárne zdroje nedosahujú takú vysokú účinnosť ako spínané treba ich dodatočne chladiť, z toho dôvodu sú k mikrokontroléru pripojené dva unipolárne tranzistory BS170, ktorých výstupy označené KA301_+12, KA301_GND, KA302_+12 a KA302_GND v schéme A.3 v prílohe A, ovládajú na základe nastavenej výkonovej strate spínač s relátkami zobrazený na obr. 26.

Na zobrazovanie výstupných hodnôt je použitý dvojriadkový 16-znakový LCD displej s radičom HD44780, z dôvodu úspory vývodov mikrokontroléra je použitá štvorbitová komunikácia medzi mikrokontrolérom a displejom, využívajú sa piny PD5, PD6, PB6 a PB7.

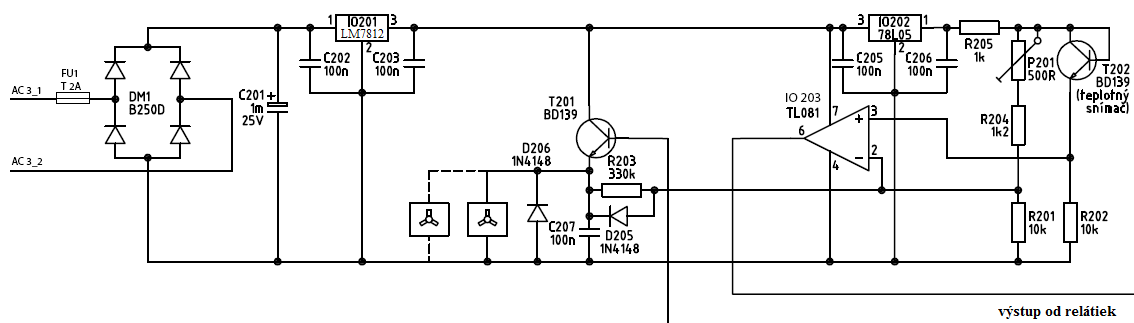
3.4 Spínanie ventilátorov a regulácia ich otáčok

V kapitole 4.3.1.2 bol popísaný spôsob zopnutia napätia na konektoroch K4 a K5 (príloha A.3). Toto napätie je následne privedené na jednoduchý spínač s relátkami obr.26.



Obr. 25: Spínač s relátkami

Ak na jednom z lineárnych zdrojov presiahne výkonová strata tú nastavenú zopne sa jedno z relátok a tým sa aktivuje obvod regulácie otáčok ventilátorov obr. 27.



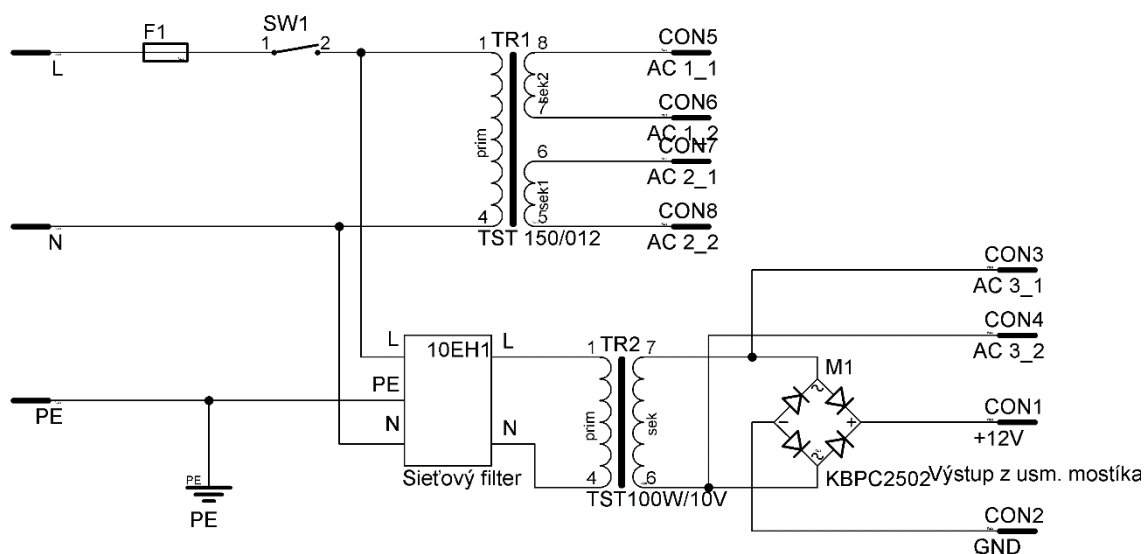
Obr. 26: Regulácia otáčok ventilátorov

Pokiaľ je úbytok na snímacom tranzistore T202 väčší ako na rezistoroch P201 a R204, ventilátor sa netočí. Pri zvýšení teploty sa tento úbytok zmenší, čo spôsobí preklopenie operačného zosilňovača IO203, otvorenie tranzistora T201 a teda pripojenie ventilátorov k napájacímu napätiu. Napájacie napätie pre snímač teploty stabilizuje stabilizátor IO202. Rezistor R205 znižuje spodnú hranicu regulácie na čo najnižšie výstupné napätie, čo zabezpečuje tichý chod ventilátorov v prípade, keď ich činnosť nie je potrebná. Jeho hodnotu je potrebné zvoliť v závislosti na použitom type ventilátorov (a napätia pri ktorom sa rozbiehajú). Dióda D205 zabezpečuje zápornú spätnú väzbu [11].

3.5 Napájanie zdrojov, obvod pomocných napätí

Pre zaistenie funkčnosti celého zariadenia je potrebné jednotlivé časti zdroja vhodne napájať, schéma zapojenia vstupného obvodu je zobrazená na obr. 27.

3.5.1 Schéma zapojenia



Obr. 27: Vstupný napájací obvod

Sieťové napätie sa cez poistku F1 a sieťový vypínač SW1 privádza na primárne vinutie sieťového transformátora TR1, tento transformátor má dve sekundárne napätia slúžiace na napájanie lineárnych zdrojov. Svorka PE je pripojená na konštrukciu zariadenia.

DC/DC meniče sú zdrojom rušenia a zároveň sú citlivé na rušenie z napájacej siete, z toho dôvodu je pred transformátor TR2 pripojený sieťový filter, ktorý toto rušenie odfiltruje. Výstup transformátora je privedený na usmerňovací mostík M1, ktorého výstup je privedený na obvod pomocných napätí obr. 28. Odbočka pred usmerňovacím mostíkom, ktorej konektory sú označené AC 3_1 a AC 3_2 slúži na napájanie obvodu regulácie otáčok ventilátorov.

3.5.2 Návrh transformátorov

3.5.2.1 Návrh transformátoru pre lineárne zdroje

$$U_{SEK} = \frac{U_{CC}}{\sqrt{2}} + U_D = \frac{32}{\sqrt{2}} + 1,4 = 24,02 \text{ V} \quad (4.3)$$

U_{CC} ... Požadované napájacie napätie lineárneho zdroja

U_D ... Úbytok napätia na diódach v mostíkovom zapojení

U_{SEK} ... Vypočítané napätie sekundárneho vinutia transformátora

Maximálny odber zdroja pri plnom zaťažení je 3A. Transformátor bude napájať oba zdroje takže bol zvolený transformátor s dvomi sekundárnymi vinutiami 24V.

Výpočet hodnoty výkonu transformátora

$$P = I_R \times U_{SEK} \times 2 = 3 \times 24 \times 2 = 144 \text{ W} \quad (4.4)$$

P ... Hodnota výkonu transformátora

I_R ... Odber transformátora pri plnom zaťažení

3.5.2.2 Návrh transformátoru pre spínaný zdroj a ostatné obvody

$$U_{SEK} = \frac{U_{CC}}{\sqrt{2}} + U_D = \frac{12}{\sqrt{2}} + 1 = 9,48 \text{ V} \quad (4.3)$$

U_{CC} ... Požadované napájacie napätie

U_D ... Úbytok napätia na diódach v mostíkovom zapojení

U_{SEK} ... Vypočítané napätie sekundárneho vinutia transformátora

Maximálny odber zdroja pri plnom zaťažení je 3,5A. Transformátor bol zvolený so sekundárnym napätím 10V.

Výpočet hodnoty výkonu transformátora

$$P = I_R \times U_{SEK} \times 2 = 3,5 \times 10 = 35W$$

(4.4)

P... Hodnota výkonu transformátora

I_R... Odber transformátora pri plnom zaťažení

Výpočet kapacity filtračného kondenzátora

$$C = \frac{k \times I_R}{p \times U_{CCR}} = \frac{300 \times 3,5}{5 \times 11,74} = 17887\mu F$$

(4.5)

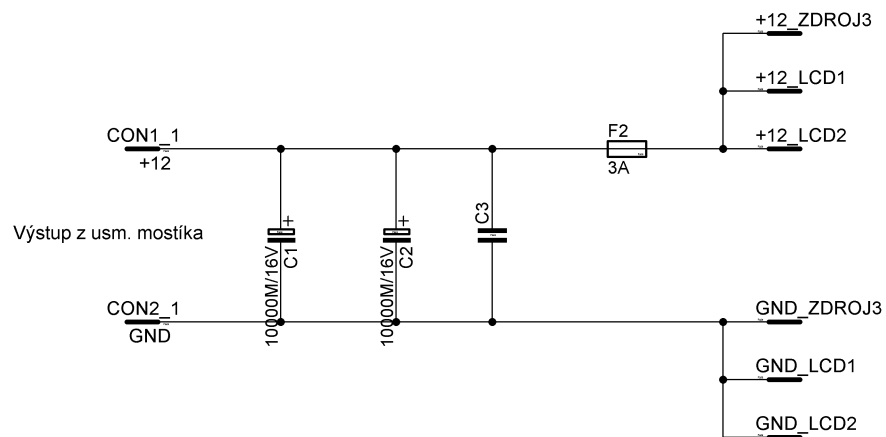
k... Konštanta pre usmerňovací mostík

I_S... Reálna veľkosť prúdu odoberaného koncovým zosilňovačom

U_{CCR}... Reálna veľkosť napájacieho napätia

p... Zvlnenie výstupného napätia v %

3.5.3 Obvod pomocných napätí



Obr. 28: Pomocný napájací zdroj

Napätie z usmerňovacieho mostíka M1 (obr. 27) je vyhladené filtračnými kondenzátormi C1 a C2, výstupné napätie slúži na napájanie spínaného zdroja a oboch meracích panelov.

4 NÁVRH CHLADENIA

Pri lineárnej regulácii vzniká najvyššia strata pri minimálnom výstupnom napätí a maximálnom výstupnom prúde, straty tvorí rozdiel dodaného a výstupného výkonu. Výkonový prvok musí tento rozdiel premeniť na teplo.

$$P_{Z(MAX)} = U \times I = 30 \times 3 = 90 \text{ W} \quad (4.1)$$

$P_{Z(MAX)}$... Stratový výkon na výkonovom prvku

Výpočet celkového tepelného odporu

$$R_{tvp} = \frac{t_v - t_0}{P_{Z(MAX)}} = \frac{200 - 40}{90} = 1,8 \text{ }^{\circ}\text{C/W} \quad (4.2)$$

R_{tvp} ... Celkový tepelný odpor

t_v ...Maximálna teplota tranzistoru udávaná výrobcom

t_0 ...Okolité teplota

Výpočet tepelného odporu chladiča

$$R_{tc} = R_{tvp} - R_{tp} - R_{tv} = 1,8 - 0,6 - 0,86 = 0,34 \text{ }^{\circ}\text{C/W} \quad (4.3)$$

R_{tc} ... Teplotný odpor chladiča

R_{tp} ... Teplotný odpor sľudovej podložky

R_{tv} ... Teplotný odpor puzdra súčiastky

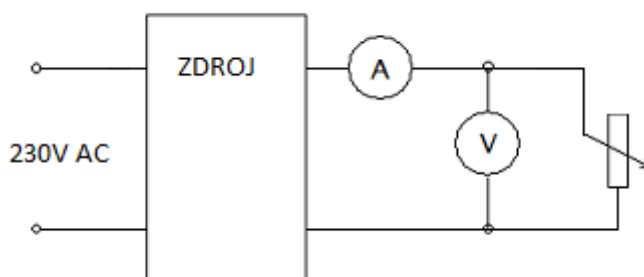
R_{tvp} ...Celkový tepelný odpor

Použitý chladič má tepelný odpor $0,9 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$, z toho dôvodu je potrebné použitie aktívneho chladenia realizovaného dvoma ventilátormi.

5 MERANIE

Po skonštruovaní zdrojov boli pre všetky tri zdroje zmerané ich zaťažovacie charakteristiky a vybrané parametre. Na meranie boli použité multimetre UNIT UT39C a AXIO AX-105, osciloskop Rigol DS1204B, výkonové rezistory a reostaty s odporom 13Ω a 44Ω .

5.1 Meranie zaťažovacích charakteristík pri konštantnom napätí

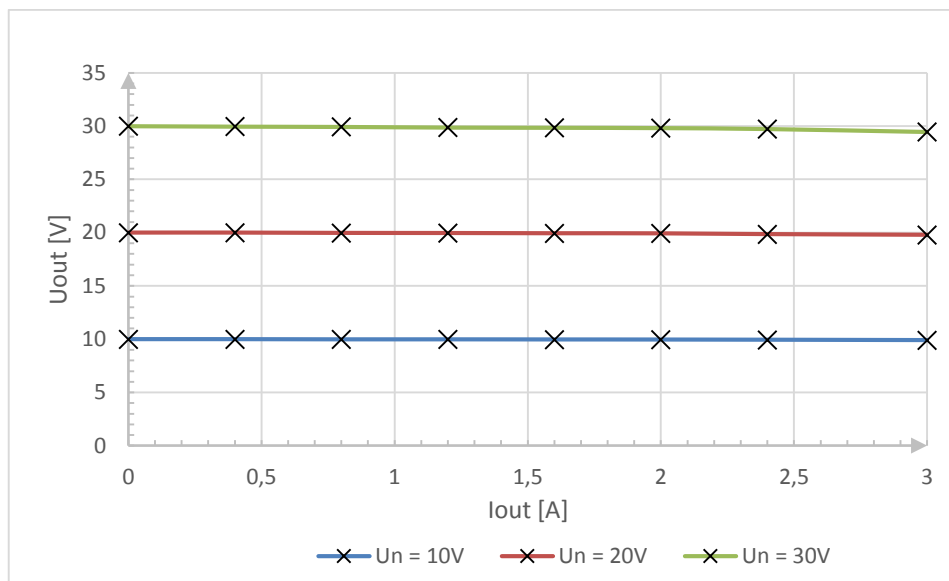


Obr. 29: Zapojenie zdroja pri meraní

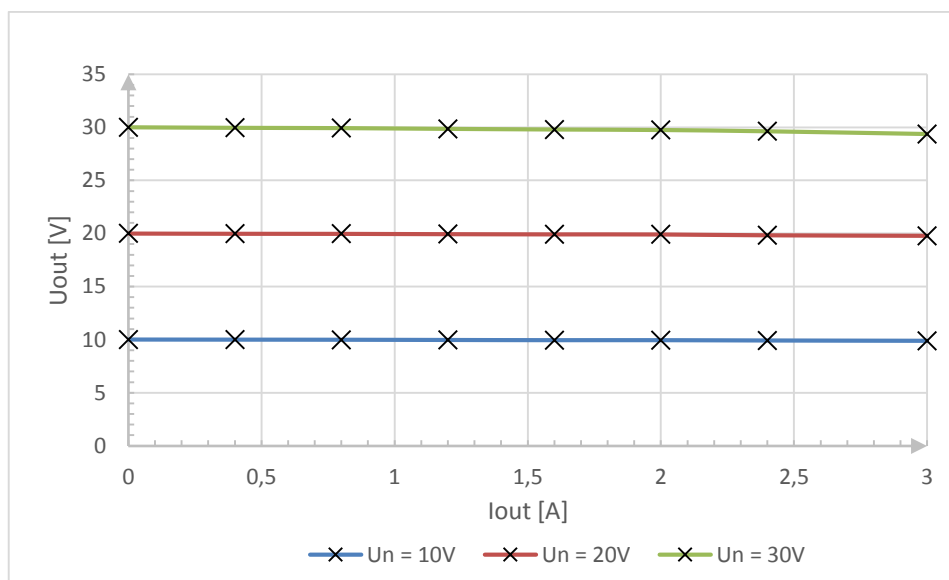
Pri meraní zaťažovacej charakteristiky bol zdroj zapojený podľa schémy na obr. 29, pri lineárnom zdroji (zdroj 1 a 2) bolo nastavené prúdové obmedzenie na maximum, výstupné napätie U_N bolo nastavené postupne na tri hodnoty a to 10V, 20V a 30V pre lineárne zdroje a 2,024V, 4,011V a 6,1V pre spínaný zdroj. Reostatom bol postupne zvyšovaný odoberaný prúd s krokom 400mA od 0 do 3A a s krokom 1A od 0 do 5A pre spínaný zdroj, presným voltmetrom bolo odčítané výstupné napätie. Zmerané závislosti boli vynesené do grafov.

Tab. 3: Zmerané hodnoty zaťažovacích charakteristík pri konštantnom napätí

	Zdroj1			Zdroj2		
$U_N[V]$	10	20	30	10	20	30
$I_{out}[A]$	$U_{out}[V]$	$U_{out}[V]$	$U_{out}[V]$	$U_{out}[V]$	$U_{out}[V]$	$U_{out}[V]$
0	10	20	30	10	20	30
0,4	10	20	29,96	9,99	19,98	29,95
0,8	9,98	19,97	29,93	9,98	19,97	29,92
1,2	9,98	19,96	29,87	9,96	19,94	29,85
1,6	9,97	19,94	29,85	9,94	19,92	29,79
2	9,96	19,93	29,82	9,94	19,91	29,74
2,4	9,94	19,86	29,73	9,91	19,83	29,62
3	9,9	19,8	29,45	9,88	19,78	29,36



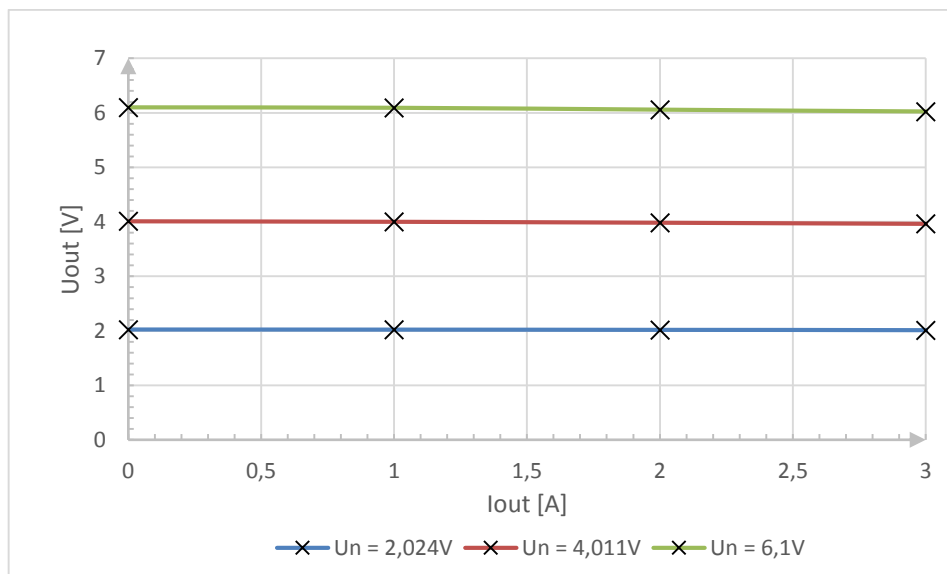
Graf 2: Zaťažovacia charakteristika pri konštantnom napätí – Zdroj1



Graf 3: Zaťažovacia charakteristika pri konštantnom napätí – Zdroj2

Tab. 4: Zmerané hodnoty zaťažovacích charakteristík pri konštantnom napätí

	Zdroj3		
Un[V]	2,024	4,011	6,1
Iout[A]	Uout[V]	Uout[V]	Uout[V]
0	2,024	4,011	6,1
1	2,022	4,002	6,092
2	2,018	3,984	6,057
3	2,012	3,963	6,023
4	1,992	3,947	6,005
5	1,984	3,932	5,998



Graf 4: Zaťažovacia charakteristika pri konštantnom napätí – Zdroj3

5.1.1 Výpočet vnútorného odporu zdrojov

Z nameraných hodnôt bol vypočítaný vnútorný odpor zdrojov podľa vzťahu

$$R_i = \frac{U_N - U_{OUT}}{I_{OUT}} [\Omega] \quad (6.1)$$

R_i ... Vnútorný odpor zdroja

U_N ... Nastavené výstupné napätie

U_{OUT} ... Zmerané výstupné napätie

I_{OUT} ... Odoberaný výstupný prúd

$$R_{iZDROJ1} = \frac{30 - 29,45}{3} = 0,183 \Omega$$

$$R_{iZDROJ2} = \frac{30 - 29,36}{3} = 0,213 \Omega$$

$$R_{iZDROJ3} = \frac{6,1 - 5,998}{5} = 0,0204 \Omega$$

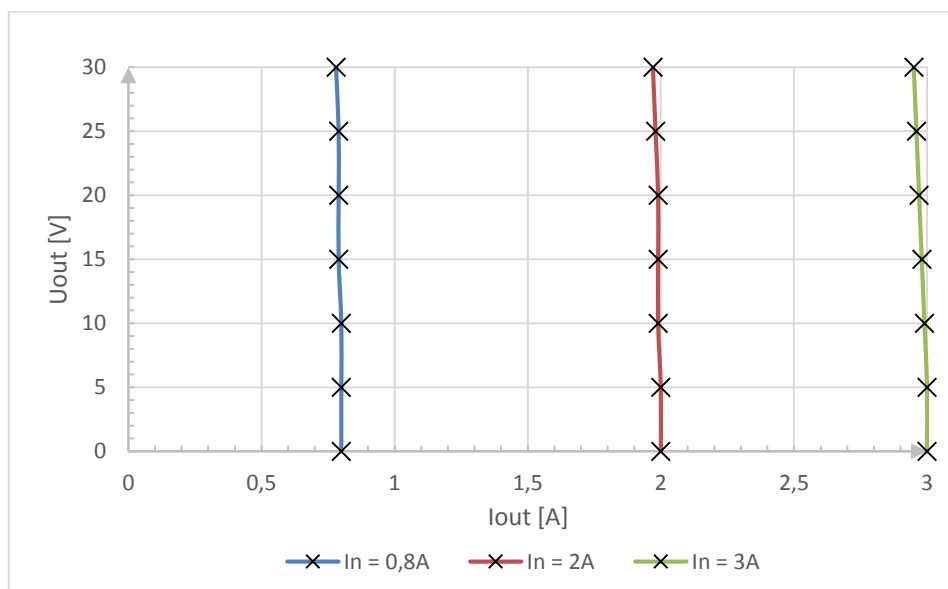
Vnútorný odpor lineárnych zdrojov (1 a 2) je približne 200mΩ, spínaný zdroj má vnútorný odpor 20,4 mΩ. Čím menšia hodnota vnútorného odporu je tým je zdroj tvrdší, všetky tri zdroje sú pomerne tvrdé.

5.2 Meranie zaťažovacích charakteristík pri konštantnom prúde

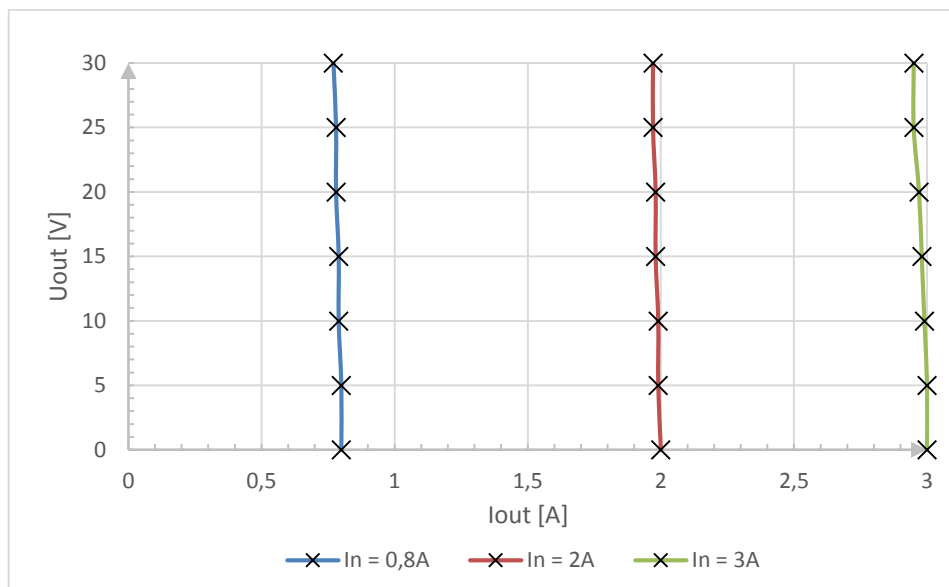
Pri meraní záťažových charakteristík s konštantným prúdom bol zdroj zapojený rovnako ako pri meraní s konštantným napätím, prúdové charakteristiky boli merané pre zdroj 1 a 2, pretože obsahujú prúdové obmedzenie. Pri meraní bolo nastavené výstupné napätia zdroja na maximum, prúdové obmedzenie I_N bolo nastavené postupne na 0,8A, 2A a 3A, záťažou na svorkách bolo nastavované napätie U_{OUT} v rozmedzí 0 až 30V s krokom 5V. Zmerané závislosti boli vynesené do grafov.

Tab. 5: Zmerané hodnoty zaťažovacích charakteristík pri konštantnom prúde

	Zdroj1			Zdroj2		
$I_N[A]$	0,8	2	3	0,8	2	3
$U_{OUT}[V]$	$I_{OUT}[A]$	$I_{OUT}[A]$	$I_{OUT}[A]$	$I_{OUT}[A]$	$I_{OUT}[A]$	$I_{OUT}[A]$
0	0,8	2	3	0,8	2	3
5	0,8	2	3	0,8	1,99	3
10	0,8	1,99	2,99	0,79	1,99	2,99
15	0,79	1,99	2,98	0,79	1,98	2,98
20	0,79	1,99	2,97	0,78	1,98	2,97
25	0,79	1,98	2,96	0,78	1,97	2,95
30	0,78	1,97	2,95	0,77	1,97	2,95



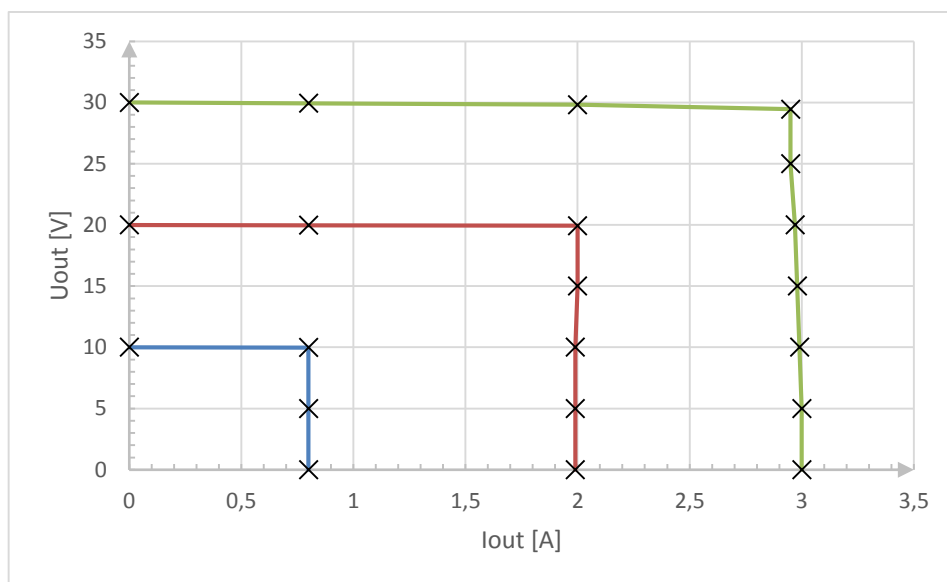
Graf 5: Záťažovacia charakteristika pri konštantnom prúde – Zdroj1



Graf 6: Záťažová charakteristika pri konštantnom prúde – Zdroj2

5.3 Voltampérová charakteristika zdroja

Spojením napäťových a prúdových charakteristík do jedného grafu dostávame voltampérovú charakteristiku zdroja. Zdroj sa správa ako zdroj napätia, vo chvíli keď výstupný prúd dosiahne hodnotu nastaveného prúdového obmedzenia začne sa chovať ako zdroj prúdu.



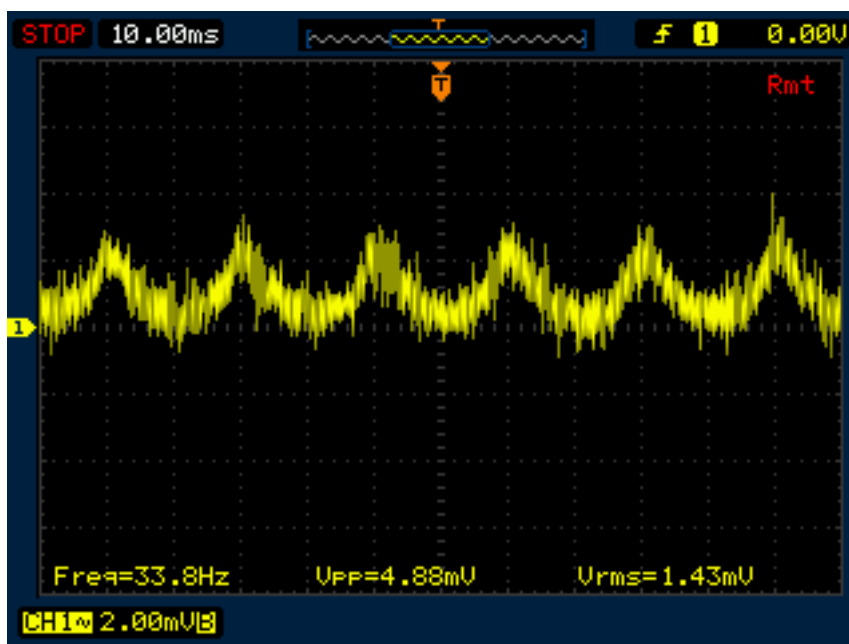
Graf 7: Voltampérová charakteristika zdroja

5.4 Zvlnenie výstupného napätia a prúdu

Pri meraní bola nastavená u lineárneho zdroja prúdová poistka na maximum, bolo nastavované napätie U_N , záťažou bol nastavený potrebný prúdový odber.

Tab. 6: Zmerané hodnoty zvlnenia napätia

	Zdroj 1		Zdroj 2		Zdroj 3	
U_N [V]	15	30	15	30	3	6
I_{out} [A]	U_{p-p} [mV]	U_{p-p} [mV]	U_{p-p} [mV]	U_{p-p} [mV]	U_{p-p} [mV]	U_{p-p} [mV]
1	4,4	4,88	4,6	4,92	12,4	14,22
2	3,76	4,96	4,32	5,12	18,61	24,19
5	-	-	-	-	41,74	59,25

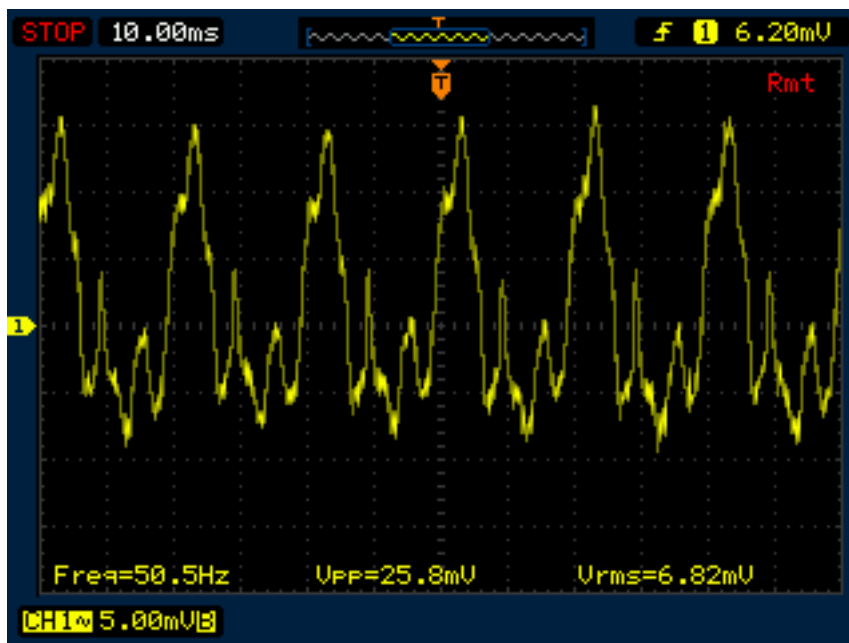


Obr. 30: Výstupné zvlnenie napätia zmerané osciloskopom

Pri meraní zvlnenia výstupného prúdu u lineárnych zdrojov bolo nastavené výstupné napätie na maximum, následne bola nastavovaná prúdová limitácia na hodnoty 1A a 2A, záťažou bolo nastavené výstupné napätie na 15V a 30V.

Tab. 7: Zmerané hodnoty zvlnenia prúdu

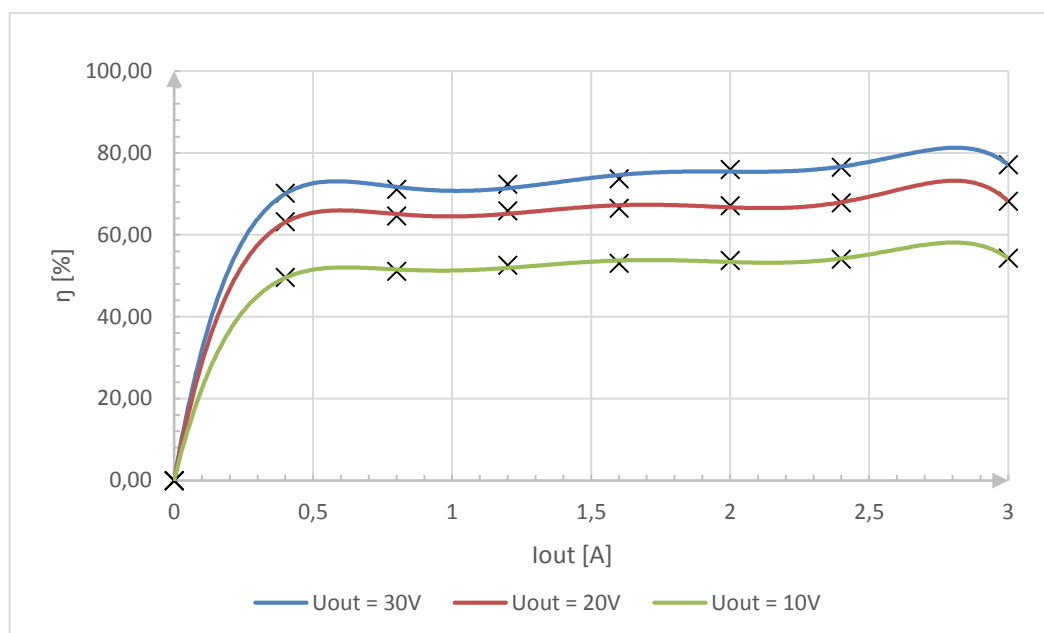
	Zdroj 1		Zdroj 2	
I_N [A]	1	2	1	2
U_{out} [V]	I_{p-p} [mA]	I_{p-p} [mA]	I_{p-p} [mA]	I_{p-p} [mA]
15	1,25	1,032	1,41	1,15
30	2,4	1,856	2,68	2,11



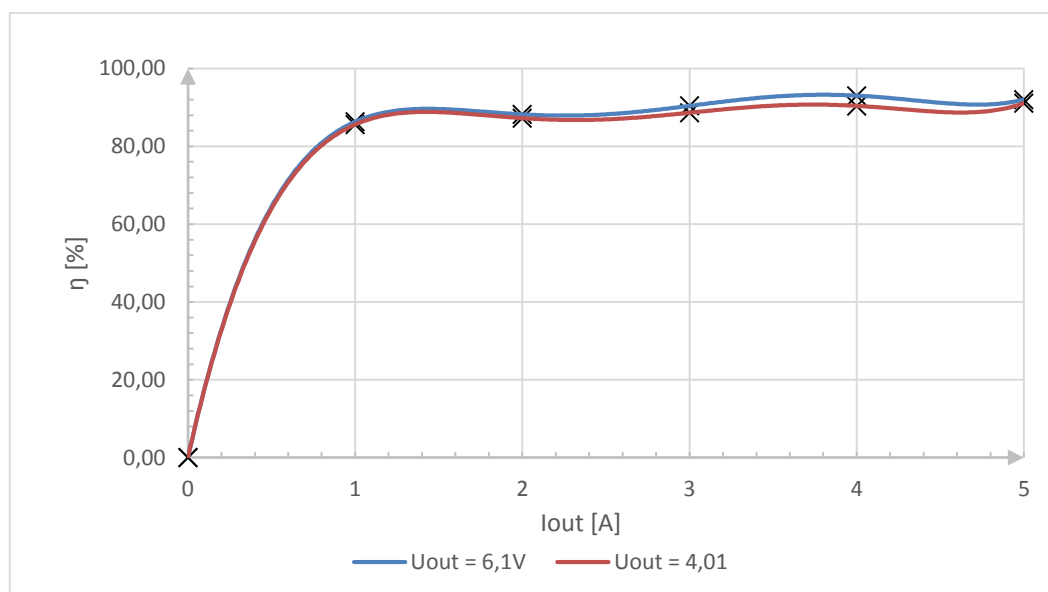
Obr. 31: Výstupné zvlínenie prúdu zmerané osciloskopom

5.5 Účinnosť

Meranie vstupných napätí a prúdov bolo realizované na sekundárnych vinutiach transformátorov bez pripojených pomocných obvodov, ktoré by znižovali účinnosť zdrojov, výstupné parametre boli merané na výstupoch zdrojov pred rezistorom slúžiacim na meranie prúdu. Pre lineárny zdroj bola meraná účinnosť pri výstupnom napätí $U_{OUT} = 10V, 20V$ a $30V$ s prúdovým odberom 0 až 3A. Spínaný zdroj bol zmeraný pre výstupné napätia 6,1V a 4,011V a výstupný prúd 0 až 5A. Zdroj 1 a 2 pri meraní vykazoval takmer totožnú účinnosť, z toho dôvodu bolo spracované iba meranie pre zdroj 1. Zmerané údaje z tabuliek (príloha E) boli vynesené do grafov.



Graf 8: Graf závislosti účinnosti na výstupném proudu – Zdroj1



Graf 9: Graf závislosti účinnosti na výstupném proudu – Zdroj3

6 NÁVRH A REALIZÁCIA DOSIEK PLOŠNÝCH SPOJOV

Pre návrh dosiek plošných spojov bol použitý program Eagle od výrobcu CADsoft. Všetky dosky sú realizované jednostranne a boli vyrobené fotocestou. Návrhy dosiek sú umiestnené v prílohe B a ich obsadzovacie plány v prílohe C.

6.1 Lineárny zdroj

Lineárny zdroj tvoria dve DPS, ktoré sú spojené distančnými stĺpikmi. Vrchnú DPS tvorí silová časť (príloha B.3), spodná časť je raz osadená reguláciou otáčok ventilátora (príloha B.1) a druhý zdroj obsahuje zapojenie s relé (príloha B.2).

6.2 Spínaný zdroj

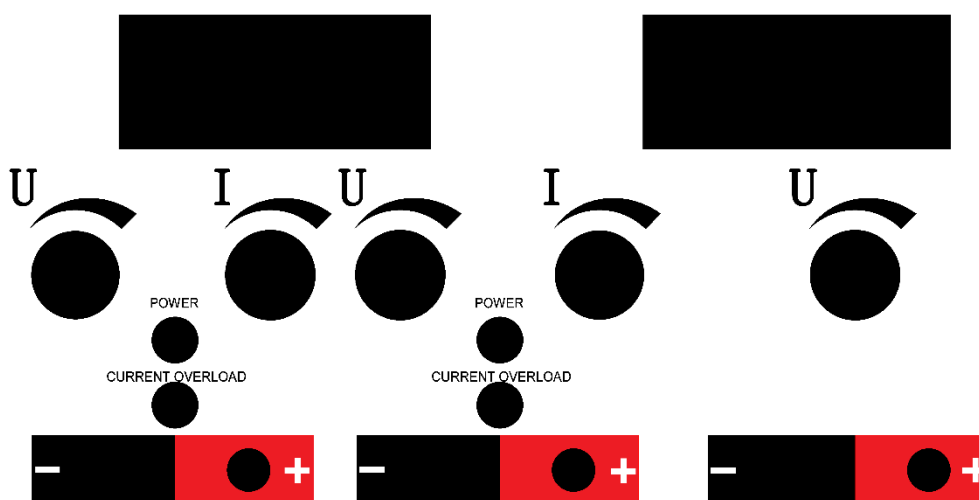
Na DPS sú osadené SMD súčiastky, na vstupné a výstupné vývody boli použité fastony.

6.3 Meracie panely

DPS meracích panelov bola navrhnutá tak aby sa dala spojiť kolíkovou lištou priamo s LCD, ktoré sa pripevňuje k prednému panelu

6.3.1 Návrh predného panelu

Predný panel bol navrhnutý v grafickom programe FrontDesigner 3.0 od výrobcu Abacom.



Obr. 32: Návrh predného panelu

ZÁVER

Cieľom tejto bakalárskej práce je návrh trojitého laboratórneho napájacieho zdroja. V prvej časti tejto práce bola v teoretickom rozbere rozobraná problematika zapojenia lineárnych a spínaných zdrojov. Nadviazaním na tieto teoretické poznatky boli v druhej kapitole navrhnuté jednotlivé časti zdroja. Na vytvorenie spínaného zdroja bol použitý regulátor LTM 4605, ktorý pracuje ako znižujúci menič. Pre zaistenie stability tohto obvodu bola prevedená jeho simulácia v programe LTpowerCAD II, na základe ktorej boli upravené hodnoty pomocných súčiastok tvoriacich zdroj. Ďalšia časť obsahuje návrh lineárneho zdroja, funkčnosť tohto obvodu bola odsimulovaná v programe Multisim, kde bola testovaná funkcia prúdového obmedzenia a bola prevedená simulácia zaťaženia zdroja pri konštantnom výstupnom napätí. Na meranie a zobrazovanie výstupných veličín bol navrhnutý obvod s mikrokontrolérom, ktorý merané veličiny zobrazuje na dvojriadkovom LCD displeji. Mikrokontrolér taktiež obsahuje možnosť spínať reguláciu otáčok ventilátora na základe odoberaného výstupného výkonu.

Pri simulácii lineárneho zdroja bol pokles výstupného napätia 690 mV, reálny zdroj je oveľa tvrdší a vykazuje pokles 120 mV (pri $U_N = 10\text{ V}$). Pri maximálnych výstupných napätiach a prúdoch bol pokles u zdroja 1 – 550 mV, zdroja 2 – 640 mV a pri spínanom zdroji 102 mV. Vnútorný odpor lineárnych zdrojov je približne 200 m Ω , spínaný zdroj je výrazne tvrdší, vnútorný odpor je 20,4 m Ω . Lineárne zdroje vykazujú malé zvlnenie výstupného napätia, približne 5 mV. Maximálna hodnota zvlnenia výstupného napätia u spínaného zdroja bola 59,25 mV, čo nie je celkom ideálne pri napájaní citlivých obvodov, avšak táto hodnota by sa dala znížiť zmenšením celkového ESR zapojenia.

Hlavnou nevýhodou použitia lineárnej koncepcie je pomerne malá účinnosť zapojenia a fakt, že nevyužitá energia sa musí premeniť na teplo. Priemerná zmeraná hodnota účinnosti bola 65%, účinnosť rástla zo zvyšovaním výstupného napätia, maximálna zmeraná účinnosť dosiahla hodnoty 77.15%. U spínaného zdroja v danej konfigurácii je výrobcom udávaná maximálna účinnosť 98%, zmeraná maximálna účinnosť bola 92,03% a priemerná sa pohybuje na hodnote 88%.

LITERATÚRA

- [1] KREJČÍŘÍK, A. *Lineární napájecí zdroje. 1. vyd.* Praha: BEN, 2002, 144s. ISBN 80-7300-002-4.
- [2] BASSO, Christophe P. *Switch-mode power supplies: SPICE simulations and practical designs.* New York: McGraw-Hill, c2008. McGraw-Hill professional engineering. ISBN 9780071508582.
- [3] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I. 1. vyd.* Praha: BEN, 1996, 341 s. ISBN 80-860-5602-3.
- [4] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče. 1. vyd.* Praha: BEN, 2001, 111 s. ISBN 80-730-0045-8.
- [5] LINEAR TECHNOLOGY, *LTM4605 - High Efficiency Buck-Boost DC/DC μ Module (Power Module) Regulator.* 2008. Dostupné z: <<http://www.linear.com/>>. [cit. 15.11.2016]
- [6] ELEKTROinzerť, *G400-Stabilizovaný zdroj.* Praha, 1996, roč. 6, č. 7. Dostupné z: <<http://paja-trb.cz>> [cit. 5.12.2016]
- [7] TEXAS INSTRUMENTS, *TL082 - Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier.* 2013. Dostupné z: <<http://www.ti.com/>> [cit. 5.12.2016]
- [8] PANDATRON, *Ovládání znakových LCD s řadičem HD44780.* 2009. Dostupné z: <[www. http://pandatron.cz](http://www.pandatron.cz)> [cit. 7.12.2016]
- [9] Hitachi Semiconductor, *HD44780U (LCD-II).* HITACHI 2002, 59s. Dostupné z: <<http://www.alldatasheet.com>> [cit. 7.12.2016]
- [10] ATMEL, *Katalogové listy ATmega16, ATmega16L.* Atmel 2010, 357s. Dostupné z: <<http://www.atmel.com/>> [cit. 5.12.2016]
- [11] BELZA, *Regulátor otáček ventilátoru v PC.* Belza 2000. Dostupné z: <<http://www.belza.cz/>> [cit. 10.12.2016]

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1:Principiálna bloková schéma lineárneho zdroja	11
Obr. 2:Jednocestný usmerňovač s nabíjacím kondenzátorom	12
Obr. 3: Jednocestný usmerňovač s nabíjacím kondenzátorom	12
Obr. 4: Mostíkový usmerňovač s nabíjacím kondenzátorom.....	13
Obr. 5: Mostíkový usmerňovač s nabíjacím kondenzátorom.....	13
Obr. 6: Stabilizátor s diódou, stabilizátor so Zenerovou diódou.....	15
Obr. 7: Bloková schéma stabilizátoru napätia	15
Obr. 8: Principiálna bloková schéma spínaného zdroja	16
Obr. 9: Priepustné zapojenie, zopnutý tranzistor	17
Obr. 10: Priepustné zapojenie, rozopnutý tranzistor	18
Obr. 11: Akumulačné zapojenie.....	18
Obr. 12: Dvojčinné zapojenie.....	19
Obr. 13: Mostíkové zapojenie, polomost	20
Obr. 14: Mostíkové zapojenie, plný most	21
Obr. 15: Bloková schéma zapojenia.....	22
Obr. 16: Typické zapojenie regulátoru LTM4605	23
Obr. 17: Závislosť efektivity a výkonových strát na vstupnom napätí	23
Obr. 18: Návrhový software LTpowerCAD II, simulácia obvodu LTM 4605	24
Obr. 19: Fázová a prenosová frekvenčná charakteristika pre výstupné napätie 5,99V a výstupný prúd 6A.....	24
Obr. 20: Schéma zapojenia spínaného regulátora LTM4605.....	25
Obr. 21: Schéma zapojenia lineárneho zdroja	27
Obr. 22: Program Multisim	29
Obr. 23: Demonštrácia prúdového obmedzenia	29
Obr. 24: Schéma zapojenia Atmega8 a LCD displeja pre spínaný zdroj	31
Obr. 25: Spínač s relátkami	32
Obr. 26: Regulácia otáčok ventilátorov.....	32
Obr. 27: Vstupný napájací obvod.....	33
Obr. 28: Pomocný napájací zdroj	35
Obr. 29: Zapojenie zdroja pri meraní	37
Obr. 30: Výstupné zvlnenie napätia zmerané osciloskopom	42
Obr. 31: Výstupné zvlnenie prúdu zmerané osciloskopom.....	43
Obr. 32: Návrh predného panelu	45

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1: Základné parametre obvodu TL082	26
Tab. 2: Odsimulované hodnoty zaťažovacej charakteristiky	30
Tab. 3: Zmerané hodnoty zaťažovacích charakteristík pri konštantnom napätí.....	37
Tab. 4: Zmerané hodnoty zaťažovacích charakteristík pri konštantnom napätí.....	38
Tab. 5: Zmerané hodnoty zaťažovacích charakteristík pri konštantnom prúde	40
Tab. 6: Zmerané hodnoty zvlnenia napätia.....	42
Tab. 7: Zmerané hodnoty zvlnenia prúdu.....	42

ZOZNAM GRAFOV

Graf 1: Simulovaná zaťažovacia charakteristika pri nastavenom konštantnom napätí	30
Graf 2: Zaťažovacia charakteristika pri konštantnom napätí – Zdroj1	38
Graf 3: Zaťažovacia charakteristika pri konštantnom napätí – Zdroj2.....	38
Graf 4: Zaťažovacia charakteristika pri konštantnom napätí – Zdroj3.....	39
Graf 5: Zaťažovacia charakteristika pri konštantnom prúde – Zdroj1	40
Graf 6: Zaťažovacia charakteristika pri konštantnom prúde – Zdroj2	41
Graf 7: Voltampérová charakteristika zdroja	41
Graf 8: Graf závislosti účinnosti na výstupnom prúde – Zdroj1	44
Graf 9: Graf závislosti účinnosti na výstupnom prúde – Zdroj3	44

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha A: Schémy zapojenia

Príloha B: Dosky plošných spojov

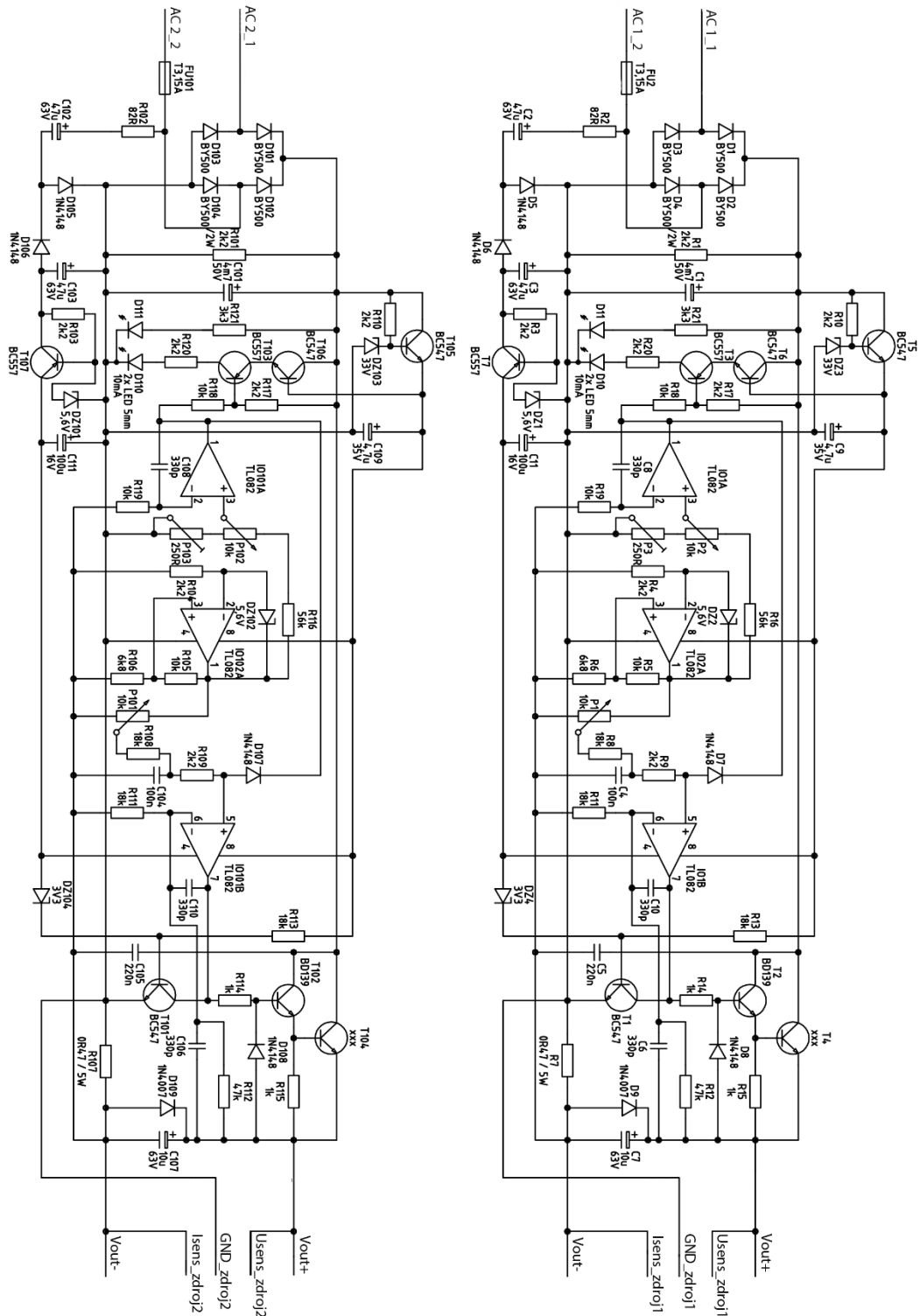
Príloha C: Osadzovacie plány

Príloha D: Zoznamy súčiastok

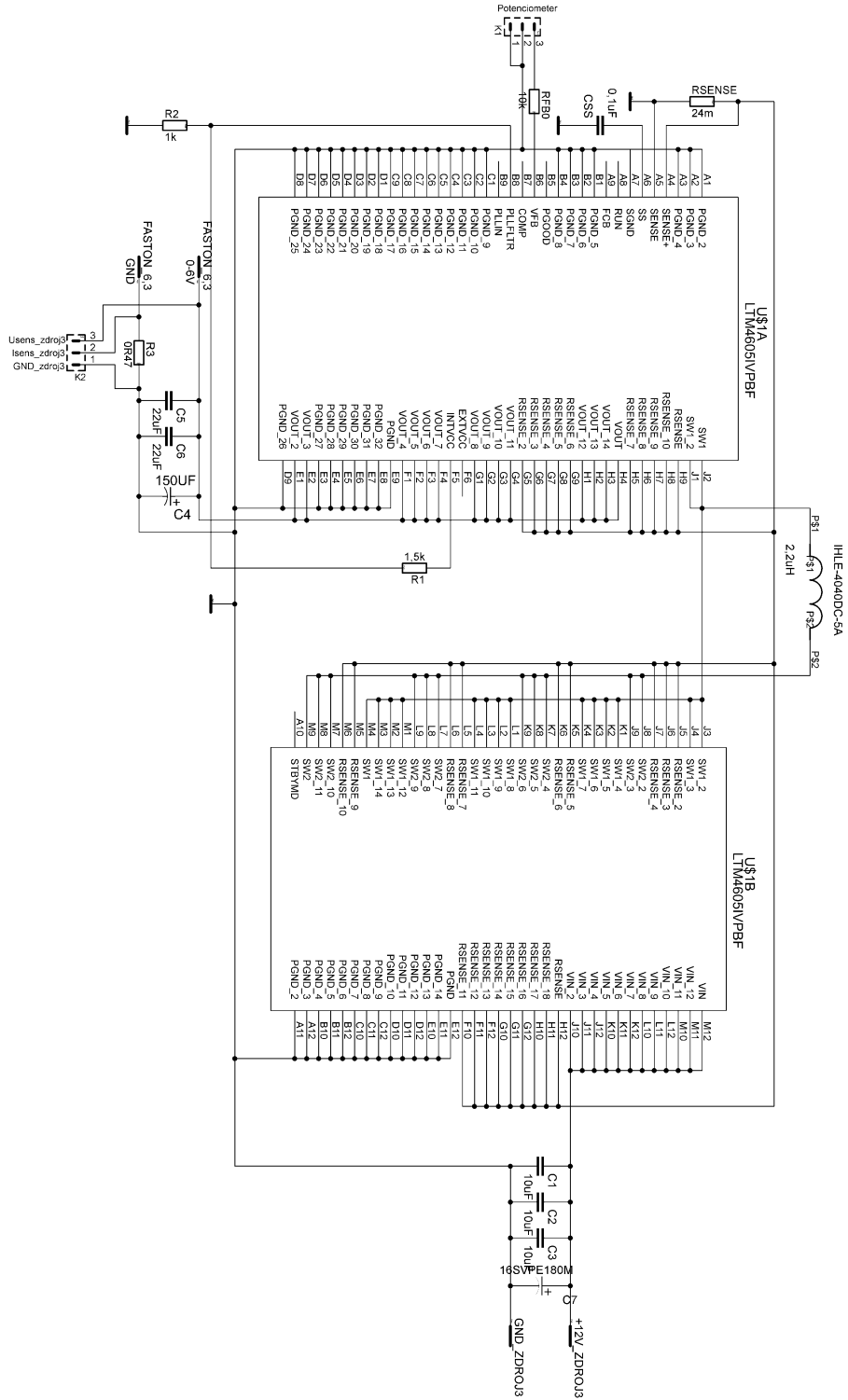
Príloha E: Tabuľky

Príloha F: Fotodokumentácia

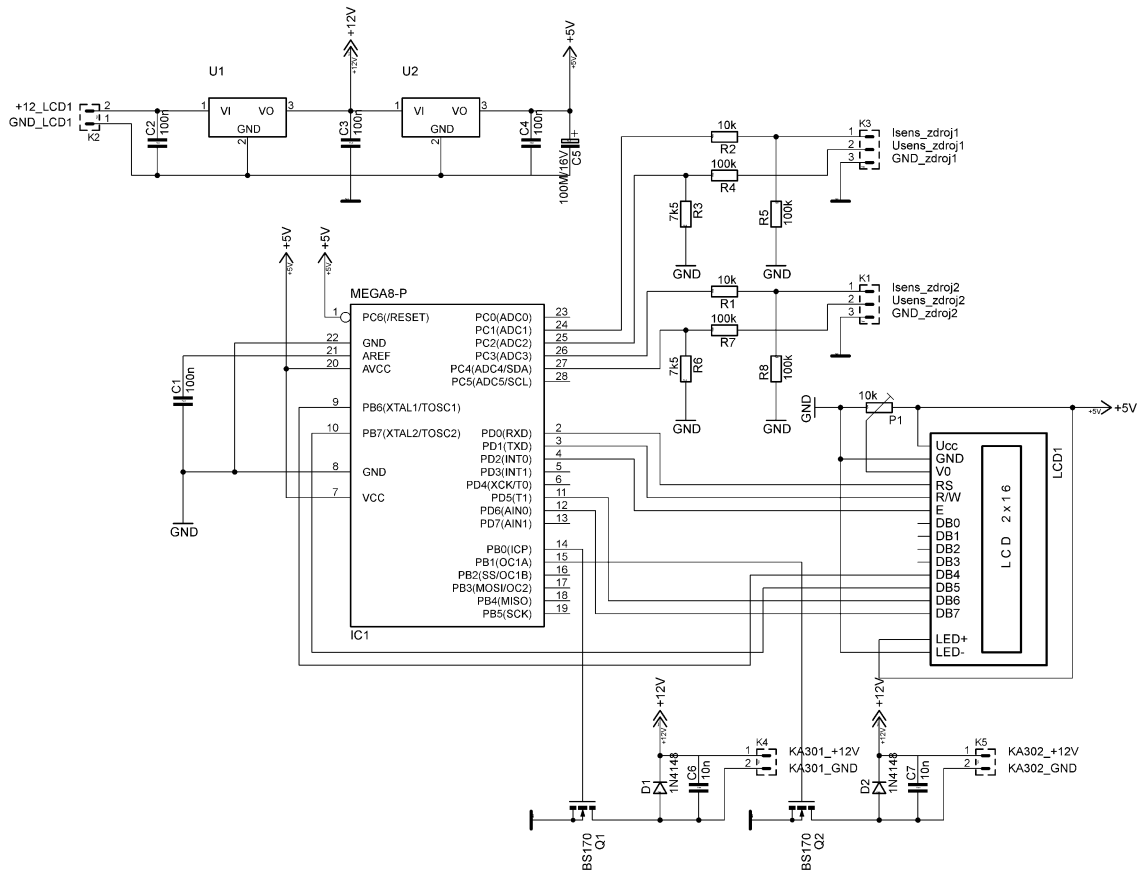
A.1 Schéma zapojenia lineárnych zdrojov



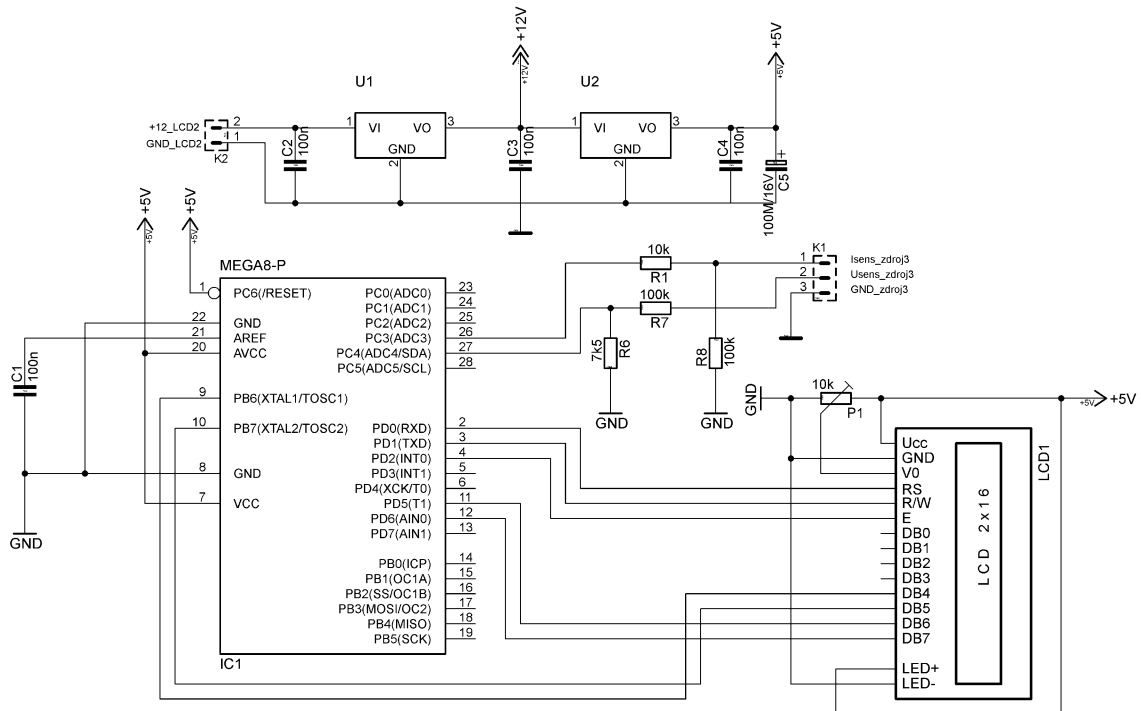
A.2 Schéma zapojenia spínaného zdroja



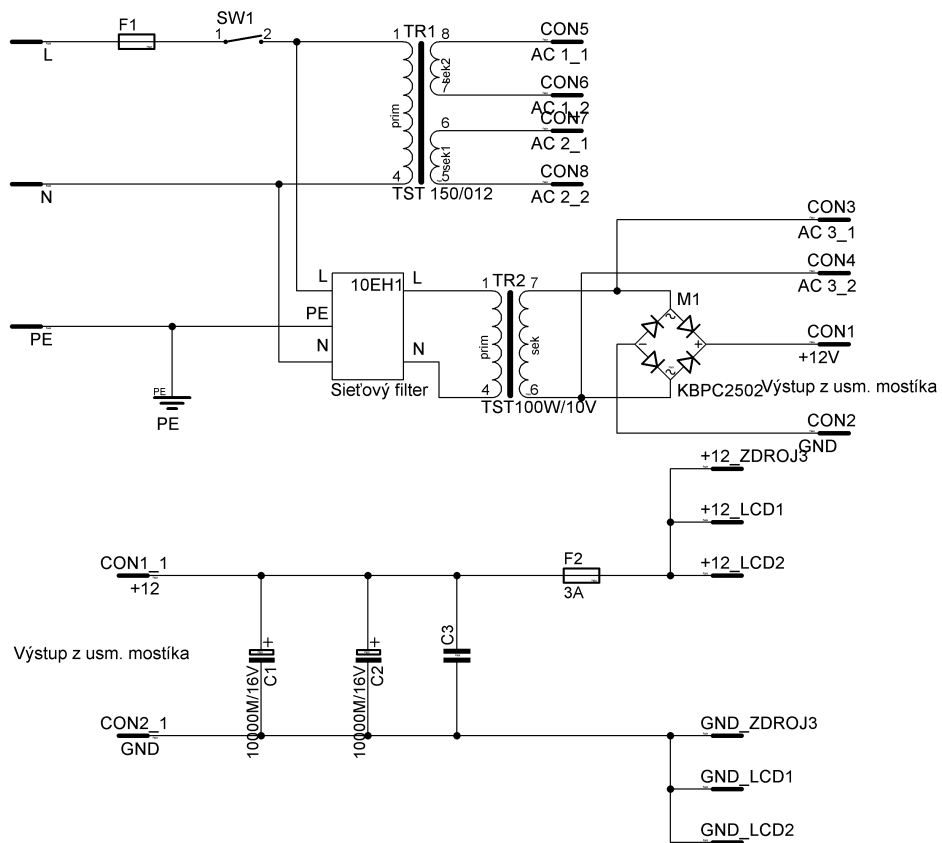
A.3 Schéma meracieho panelu pre zdroj 1 a 2



A.4 Schéma meracieho panelu pre zdroj 3

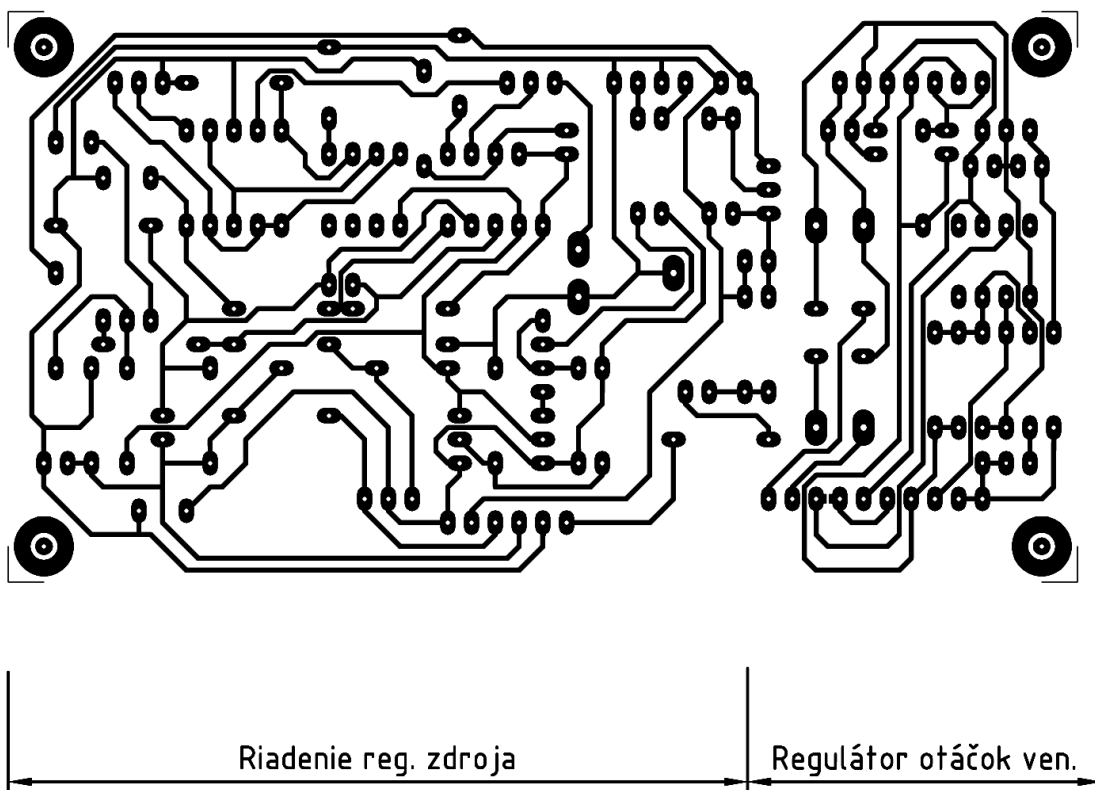


A.5 Schéma zapojenia s transformátormi a pomocným zdrojom

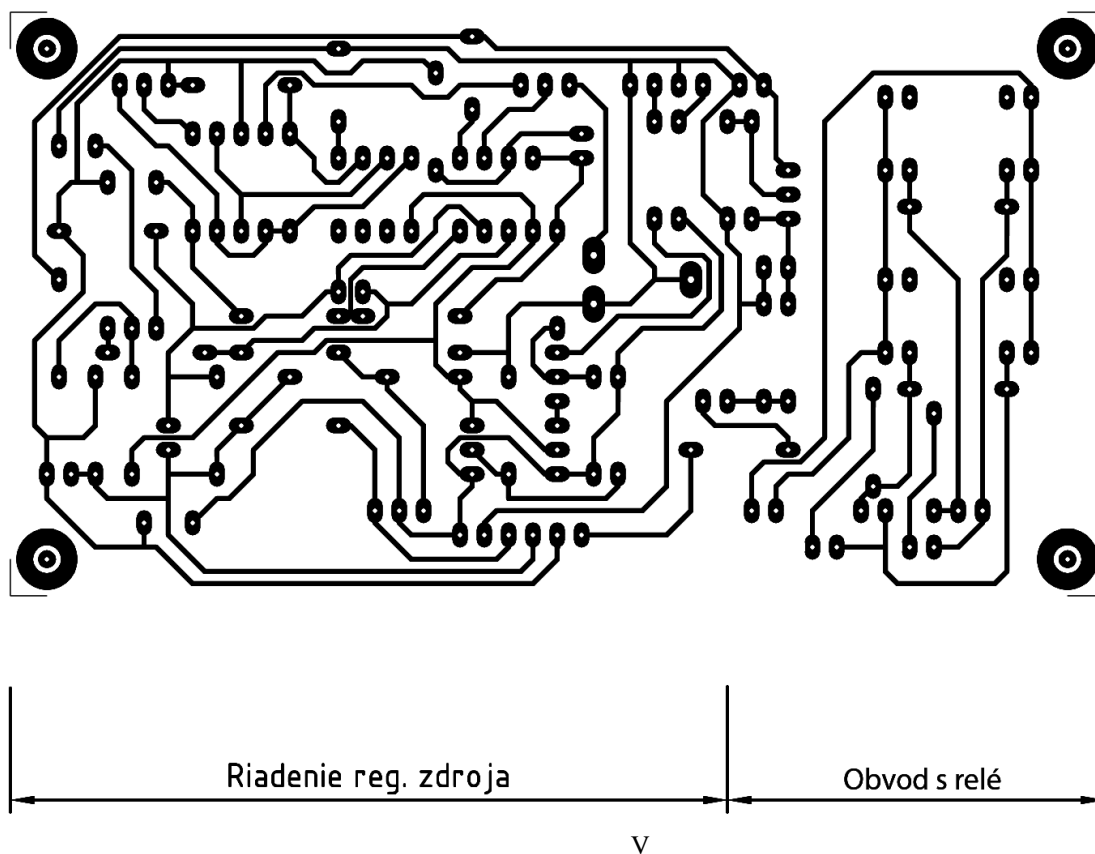


B Dosky plošných spojov

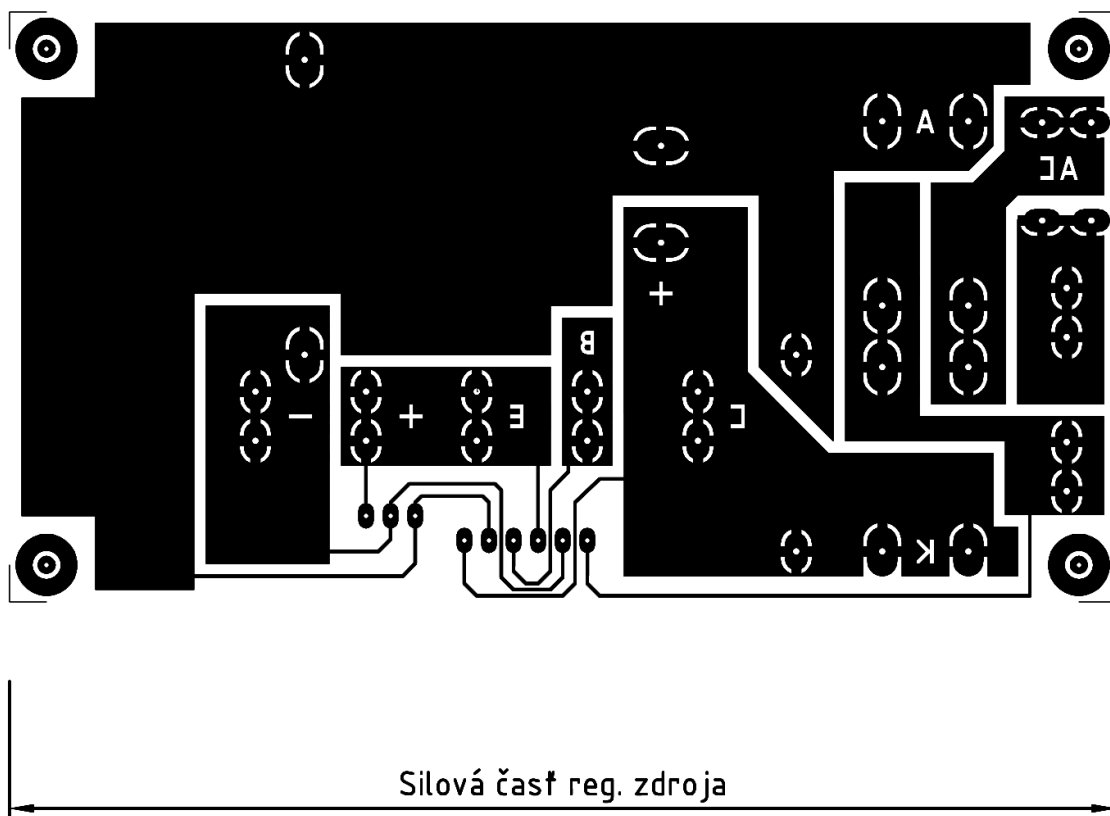
B.1 Lineárny zdroj, riadenie a regulátor otáčok ventilátorov (bottom)



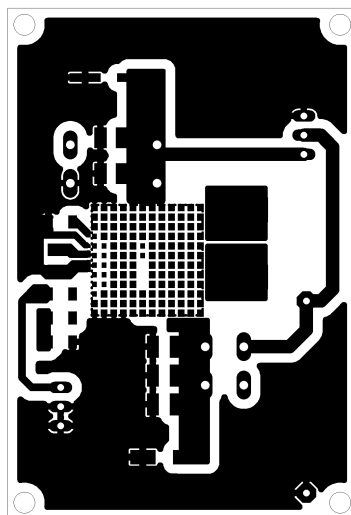
B.2 Lineárny zdroj, riadenie a obvod s relé (bottom)



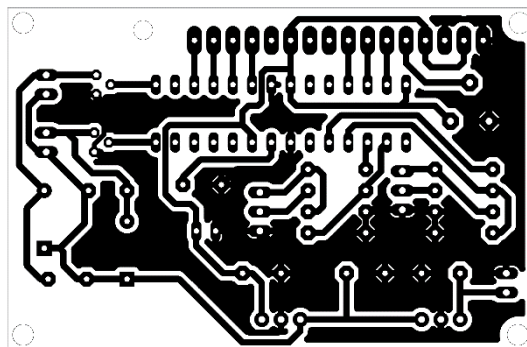
B.3 Lineárny zdroj silová časť (bottom)



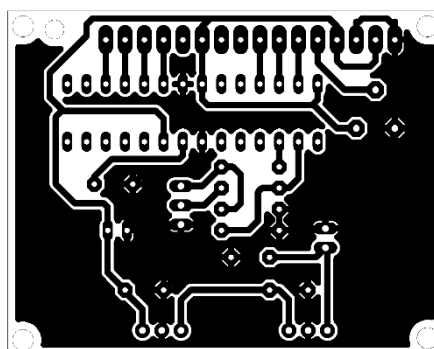
B.4 Spínaný zdroj (top)



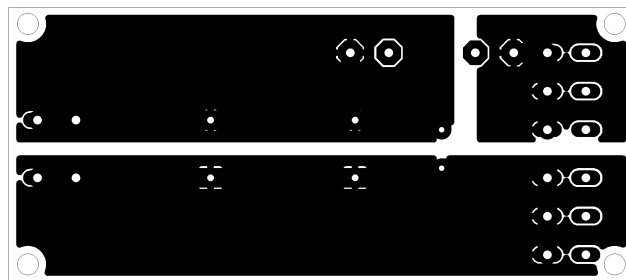
B.5 Merací panel pre zdroj 1 a 2 (bottom)



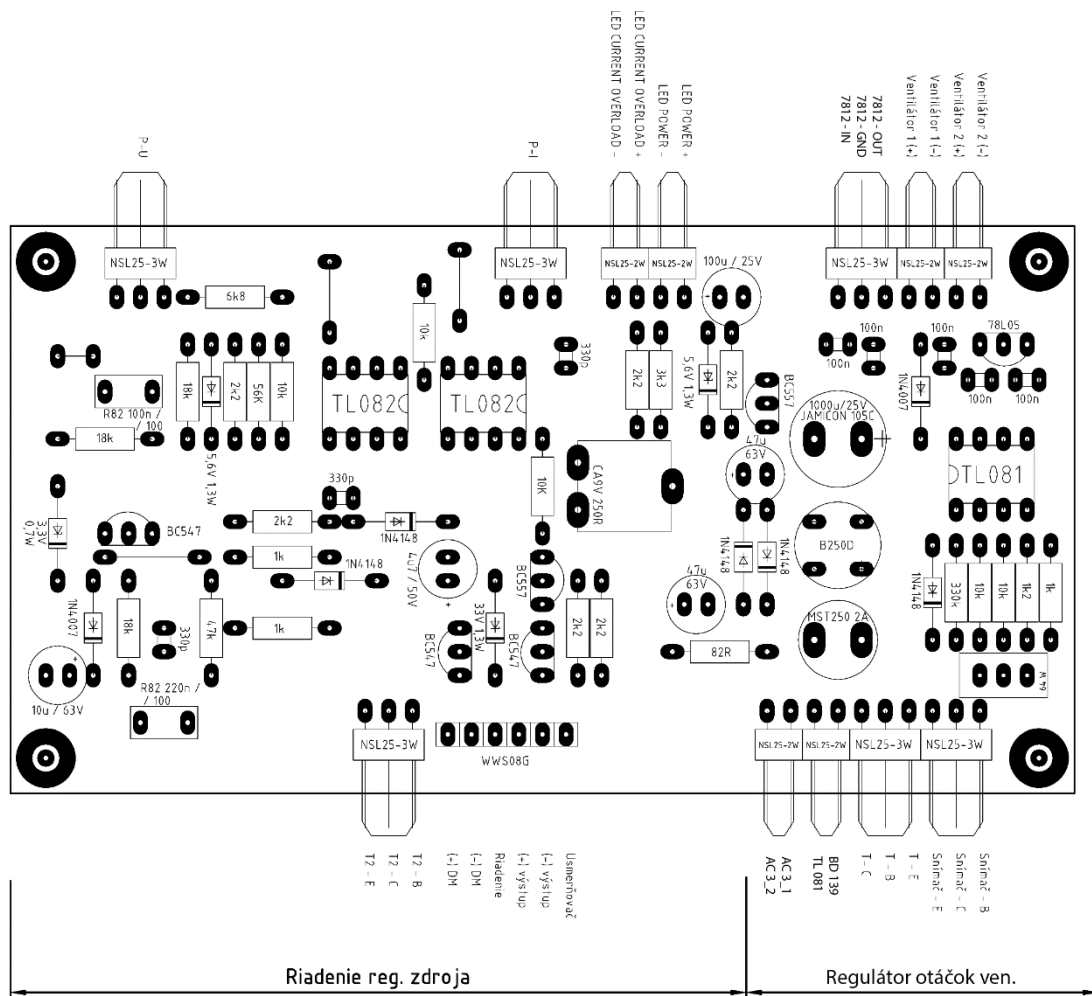
B.6 Merací panel pre zdroj 3 (bottom)



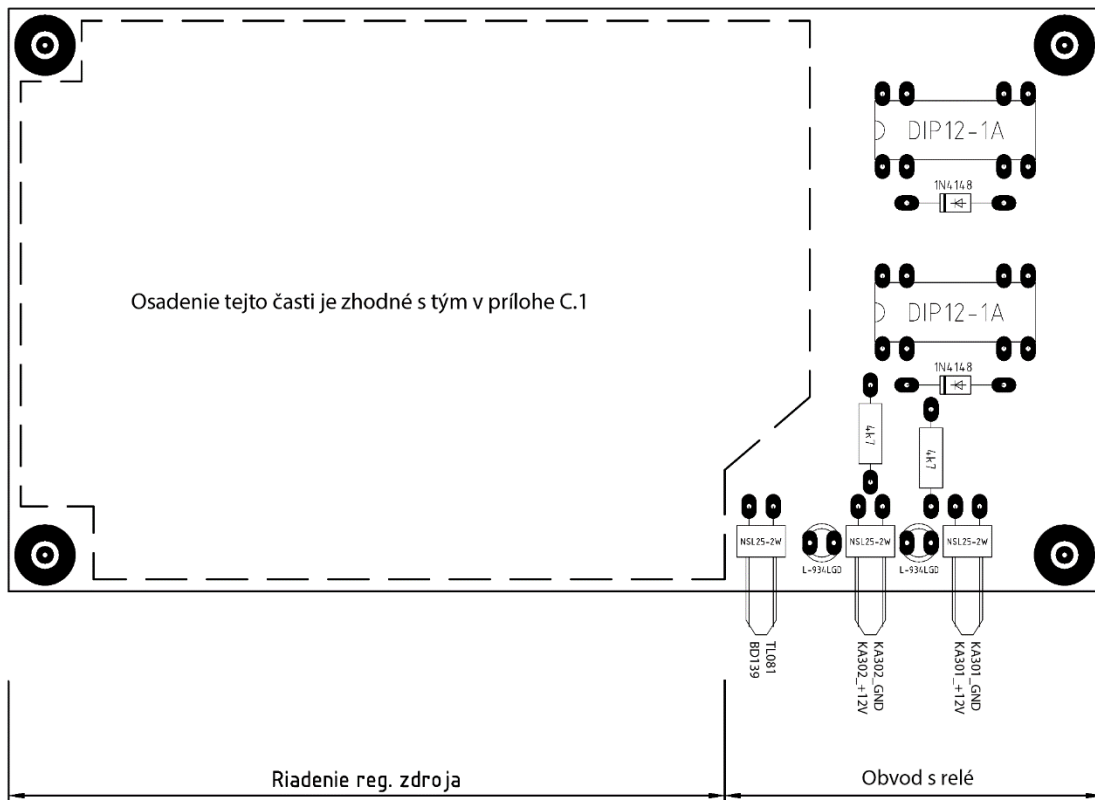
B.7 Pomocný zdroj pre meracie panely a spínaný zdroj (bottom)



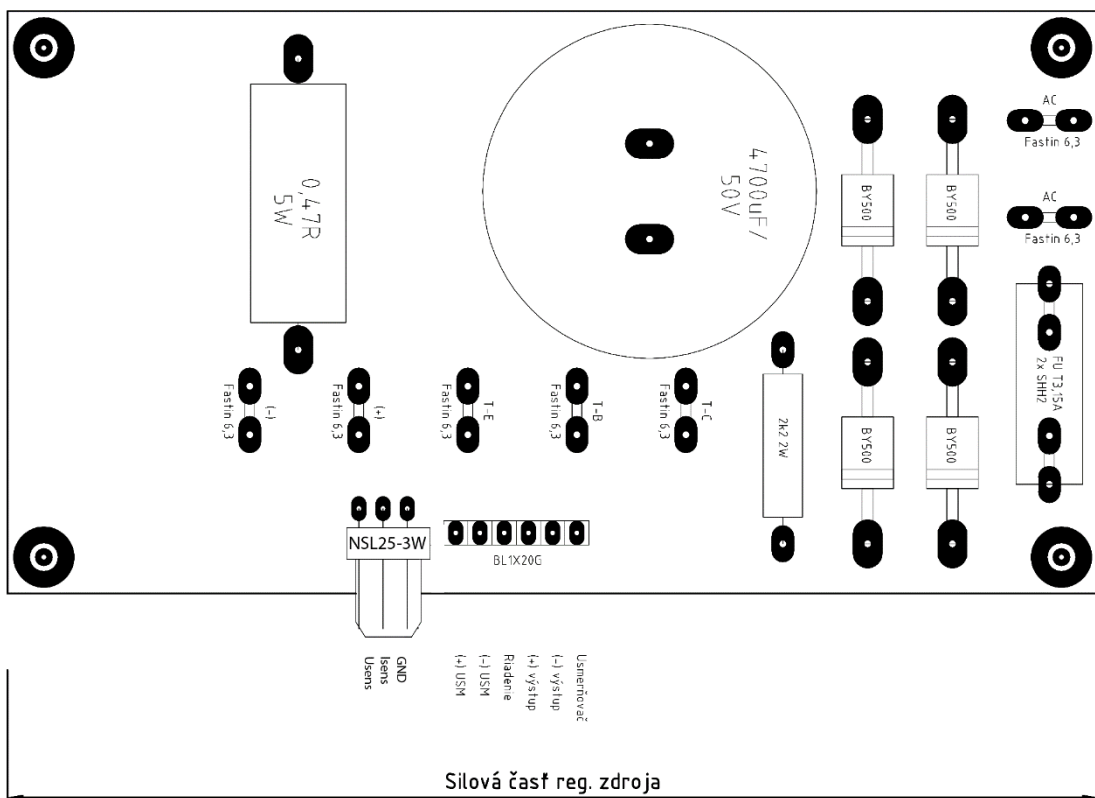
C.1 Lineárny zdroj, riadenie a regulátor otáčok ventilátorov



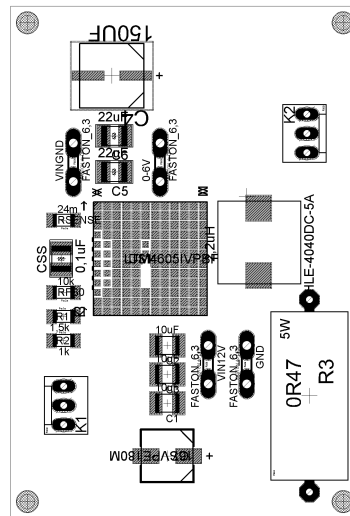
C.2 Lineárny zdroj, riadenie a obvod s relé



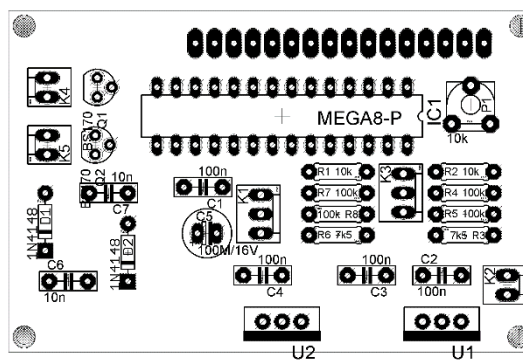
C.3 Lineárny zdroj silová časť



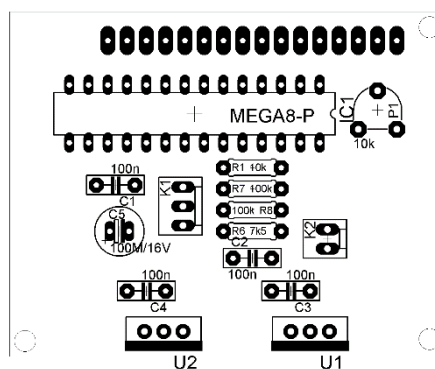
C.4 Spínaný zdroj



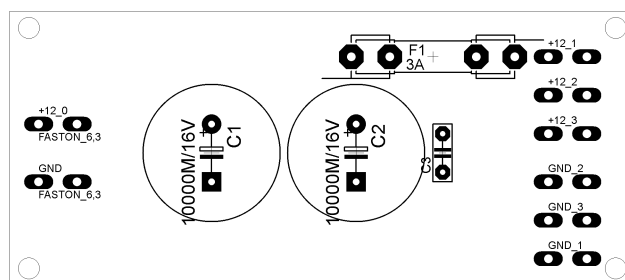
C.5 Merací panel pre zdroj 1 a 2



C.6 Merací panel pre zdroj 3



C.7 Pomocný zdroj pre meracie panely a spínaný zdroj



D Zoznamy súčiastok

D.1 Lineárny zdroj – riadenie a silová časť (pre druhý index +100)

Lineárny zdroj			
Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
R1	2k2	2W	Rezistor metalizovaný
R2	82R	0,6W	Rezistor metalizovaný
R3, R4, R9, R10, R17, R20	2k2	0,6W	Rezistor metalizovaný
R5, R18, R19	10k	0,6W	Rezistor metalizovaný
R6	6k8	0,6W	Rezistor metalizovaný
R7	0R47	16W	Rezistor drôtový
R8, R11, R13	18k	0,6W	Rezistor metalizovaný
R12	47k	0,6W	Rezistor metalizovaný
R16	56k	0,6W	Rezistor metalizovaný
R14, R15	1k	0,6W	Rezistor metalizovaný
R21	3k3	0,6W	Rezistor metalizovaný
P1, P2	10k	4W /6mm	Potenciometer
P3	250R	CA9V	Trimer
C1	4m7/50V	RM 10	Kondenzátor elektrolytický
C2, C3	47u/63V	RM 2,5	Kondenzátor elektrolytický
C4	100n	RM 5	Kondenzátor fóliový
C5	220n	RM 5	Kondenzátor fóliový
C6, C8, C10	330p	RM 2	Kondenzátor keramický
C7	10u/63V	RM 2,5	Kondenzátor elektrolytický
C9	4u7/35V	RM 2,5	Kondenzátor elektrolytický
C11	100u/16V	RM 2,5	Kondenzátor elektrolytický
D1, D2, D3, D4,	BY500	DO27	Usmerňovacia dióda
D5, D6, D7, D8	1N4148	DO35	Usmerňovacia dióda
D9	1N4007	DO41	Usmerňovacia dióda
D10	Led 10mA, čer.	5mm	Luminiscenčná dióda
D11	Led 10mA, zel.	5mm	Luminiscenčná dióda
DZ1, DZ2	5,6V, 1,3W	BZX85C	Zenerová dióda
DZ3	33V, 1,3W	BZX85C	Zenerová dióda
DZ4	3,3V, 0,5W	BZX79C	Zenerová dióda
T1, T5, T6	BC547	TO-92	Tranzistor
T2	BD139	TO-126	Tranzistor
T3, T7	BC557	TO-92	Tranzistor
T4	2N3773	TO-3	Tranzistor
IO1, IO2	TL082	DIP8	Operačný zosilňovač
FU2	T3,15A	SHH2	Poistka trubičková 5x20mm
-	7ks fastin 6,3	FIN63-P	Faston
2ks 2 pin konektor	-	NSG25-2	Konektor
2ks 2 pin konektor uhl.	-	NSL25-2W	Konektor
4ks 3 pin konektor	-	NSG25-3	Konektor
4ks 3 pin konektor uhl.	-	NSL25-3W	Konektor
1ks kolíková lišta 1x8 rovná	-	WWS08G	Prepojovacia lišta
1ks dutin.lišta 1x20 rovná	-	BL1X20G	Prepojovacia lišta

D.2 Regulátor otáčok ventilátora

Regulátor otáčok ventilátora			
Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
R201, R202	10k	0,6W	Rezistor metalizovaný
R203	330k	0,6W	Rezistor metalizovaný
R204	1k2	0,6W	Rezistor metalizovaný
R205	1k	0,6W	Rezistor metalizovaný
P201	500R	500mW	Trimer
C201	1m/25V	RM5	Kondenzátor elektrolytický
C202, C203, C204, C205, C206	100n	RM5	Kondenzátor keramický
DM201	B250R	-	Usmerňovací mostík
D205	1N4148	DO35	Usmerňovacia dióda
D206	1N4007	DO41	Usmerňovacia dióda
T201, T202	BD139	TO-126	Tranzistor
IO201	LM7815	TO-220	Stabilizátor
IO202	78L05	TO92	Stabilizátor
IO203	TL081	DIP08	Operačný zosilňovač
FU201	T 2A	MST 250	Poistka
4ks 2 pin konektor	-	NSG25-2	Konektor
4ks 2 pin konektor uhl.	-	NSL25-2W	Konektor
3ks 3 pin konektor	-	NSG25-3	Konektor
3ks 3 pin konektor uhl.	-	NSL25-3W	Konektor

D.3 Obvod spínania relé

Obvod spínania relé			
Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
R301, R302	4k7	0,6W	Rezistor metalizovaný
D301, D303	1N4148	DO35	Usmerňovacia dióda
D302, D304	Led 2mA, zel.	3mm	Luminiscenčná dióda
KA301, KA302	DIP12-1A	DIP14	Relé
3ks 2 pin konektor	-	NSG25-2	Konektor
3ks 2 pin konektor uhl.	-	NSL25-2W	Konektor

D.4 Spínaný zdroj

Spínaný zdroj			
Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
U1	LTM4605IV	LGA141	DC/DC menič
R1	1,5k	1206	Rezistor
R2	1k	1206	Rezistor
RFB0	10k	1206	Rezistor
RSENSE	24m	1206	Rezistor
R3	0R47	16W	Rezistor drôtový
C1,C2,C3	10uF/35V	1210	Kondenzátor keramický
C4	150uF/35V	EEEF1V151AP	Kondenzátor elektrolytický
C5,C6	22uF/16V	1210	Kondenzátor keramický
C7	180uF/16V	16SVPE180M	Kondenzátor elektrolytický
CSS	0,1uF/25V	1210	Kondenzátor keramický
L	2,2uH	IHLE-4040DC-5A	Cievka
3ks 2 pin konektor	-	NSG25-2	Konektor
3ks 2 pin konektor	-	NSL25-2P	Konektor
P1	500k	4W	Potenciometer
-	4ks fastin 6,3	FIN63-P	Faston

D.5 Ostatné súčasti

Ostatné súčasti			
Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
F1	T1,5A	Eurokonektor	Poistka trubičková 5x20mm
IEC 60320	250VAC/10A	-	Sieťový konektor
ROCKER	16A/250VAC	2 polohy	Sieťový vypínač
10EH1	250VAC/10A	6,3mm	Odrušovací filter
TR1	230V/2x 24V-3A		Sieťový transformátor
TR2	230V/1x 10V-10A		Sieťový transformátor
M1	KBPC2502		Usmerňovací mostík
LCD1,LCD2	16x2		Alfanumerický LCD
FAN1,FAN2	12 V/165 mA	92x92x25	Ventilátory
3ks čierny	30A;60VDC	4mm/59mm	Banánik
3ks červený	30A;60VDC	4mm/59mm	Banánik

D.6 Meracie panely

Merací panel pre zdroj 3			
Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
R1	10k	0,6W	Rezistor metalizovaný
R6	7,5k	0,6W	Rezistor metalizovaný
R7,R8	100k	0,6W	Rezistor metalizovaný
P1	10k	PT6V	Trimer
C1,C2,C3,C4	100n	RM5	Kondenzátor fóliový
C5	0,1uF/16V	RM 2,5	Kondenzátor elektrolytický
IC1	ATMEGA8-P	DIL28	Mikrokontrolér
U1	7812	TO-220	Stabilizátor
U2	7815	TO-220	Stabilizátor
1ks 2 pin konektor	-	NSG25-2	Konektor
1ks 2 pin konektor	-	NSL25-2P	Konektor
1ks 3 pin konektor	-	NSG25-3	Konektor
1ks 3 pin konektor	-	NSL25-3P	Konektor
1ks dutin.lišta 1x20 rovná	-	BL1X20G	Prepojovacia lišta
Merací panel pre zdroj 1 a 2 obsahuje navyše			
Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
R2	10k	0,6W	Rezistor metalizovaný
R3	7,5k	0,6W	Rezistor metalizovaný
R4,R5	100k	0,6W	Rezistor metalizovaný
Q1,Q2	BS170	sot54e	Tranzistor unipolárny
C6,C7	10n/63V	RM 5	Kondenzátor fóliový
D1,D2	1N4148	DO35	Usmerňovacia dióda
2ks 2 pin konektor	-	NSG25-2	Konektor
2ks 2 pin konektor	-	NSL25-2P	Konektor
1ks 3 pin konektor	-	NSG25-3	Konektor
1ks 3 pin konektor	-	NSL25-3P	Konektor

D.7 Pomocný zdroj

Pomocný zdroj			
Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
C1,C2	10m/16V	RM 7,5	Kondenzátor elektrolytický
C3	100n/63V	RM 5	Kondenzátor fóliový
F2	T3,15A	SHH2	Poistka trubičková 5x20mm
-	8ks fastin 6,3	FIN63-P	Faston

E Tabuľky

E.1 Tabuľky účinnosti spínaného zdroja

U_{IN} [V]	I_{IN} [A]	P_{IN} [W]	U_{OUT} [V]	I_{OUT} [A]	P_{OUT} [W]	η [%]
12,74	0,03	0,382	6,1	0	0,000	0,00
12,74	0,554	7,058	6,092	1	6,092	86,31
12,74	1,078	13,734	6,057	2	12,114	88,21
12,74	1,569	19,989	6,023	3	18,069	90,39
12,74	2,027	25,824	6,005	4	24,020	93,01
12,74	2,558	32,589	5,998	5	29,990	92,03

U_{IN} [V]	I_{IN} [A]	P_{IN} [W]	U_{OUT} [V]	I_{OUT} [A]	P_{OUT} [W]	η [%]
12,74	0,03	0,382	4,011	0	0,000	0,00
12,74	0,367	4,676	4,002	1	4,002	85,59
12,74	0,717	9,135	3,984	2	7,968	87,23
12,74	1,053	13,415	3,963	3	11,889	88,62
12,74	1,371	17,467	3,947	4	15,788	90,39
12,74	1,694	21,582	3,932	5	19,660	91,10

E.2 Tabuľky účinnosti lineárneho zdroja

U_{IN} [V]	I_{IN} [A]	P_{IN} [W]	U_{OUT} [V]	I_{OUT} [A]	P_{OUT} [W]	η [%]
32,54	0,1	3,254	30	0	0,000	0,00
32,31	0,528	17,064	29,96	0,4	11,984	70,23
32,14	1,048	33,667	29,93	0,8	23,944	71,12
31,98	1,549	49,536	29,87	1,2	35,844	72,36
31,82	2,037	64,821	29,85	1,6	47,760	73,68
31,57	2,487	78,505	29,82	2	59,640	75,97
31,44	2,965	93,220	29,73	2,4	71,352	76,54
31,29	3,660	114,521	29,45	3	88,350	77,15

U_{IN} [V]	I_{IN} [A]	P_{IN} [W]	U_{OUT} [V]	I_{OUT} [A]	P_{OUT} [W]	η [%]
32,54	0,1	3,254	20	0	0,000	0,00
32,41	0,391	12,656	20	0,4	8,000	63,21
32,29	0,766	24,719	19,97	0,8	15,976	64,63
32,12	1,132	36,363	19,96	1,2	23,952	65,87
31,97	1,500	47,962	19,94	1,6	31,904	66,52
31,88	1,863	59,386	19,93	2	39,860	67,12
31,69	2,216	70,239	19,86	2,4	47,664	67,86
31,57	2,756	87,020	19,8	3	59,400	68,26

U_{IN} [V]	I_{IN} [A]	P_{IN} [W]	U_{OUT} [V]	I_{OUT} [A]	P_{OUT} [W]	η [%]
32,54	0,100	3,254	10	0	0,000	0,00
32,45	0,248	8,056	10	0,4	4,000	49,65
32,31	0,483	15,618	9,98	0,8	7,984	51,12
32,26	0,705	22,755	9,98	1,2	11,976	52,63
32,21	0,934	30,070	9,97	1,6	15,952	53,05
32,15	1,153	37,060	9,96	2	19,920	53,75
32,04	1,376	44,088	9,94	2,4	23,856	54,11
31,97	1,711	54,696	9,9	3	29,700	54,30

F Fotodokumentácia

F1. Predný panel zdroja



F.2 Pohľad do vnútra zdroja



F.3 Zadný panel zdroja

